

Dasar-dasar keselamatan bahan bakar hidrogen

(ISO/TR 15916:2004, MOD)



© BSN 2014

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh isi dokumen ini dengan cara dan dalam bentuk apapun serta dilarang mendistribusikan dokumen ini baik secara elektronik maupun tercetak tanpa izin tertulis dari BSN

BSN
Gd. Manggala Wanabakti
Blok IV, Lt. 3,4,7,10.
Telp. +6221-5747043
Fax. +6221-5747045
Email: dokinfo@bsn.go.id
www.bsn.go.id

Diterbitkan di Jakarta

Daftar isi

Daftar isi.....	i
Prakata	ii
Pendahuluan.....	iii
1 Ruang lingkup.....	1
2 Acuan normatif.....	1
3 Istilah dan definisi	1
4 Penggunaan hidrogen	15
5 Persyaratan keselamatan penggunaan hidrogen gas dan cair	20
6 Sifat dasar hidrogen.....	26
7 Mitigasi dan pengendalian resiko	30
Lampiran A (Informatif) Sifat-sifat hidrogen	52
Lampiran B (Informatif) Data pembakaran hidrogen	55
Lampiran C (Informatif) Data material	59
Lampiran D (Informatif) Senyawa penyimpan hidrogen	64
Lampiran E (Informatif) Istilah dan definisi	65
Lampiran F (Informatif) Daftar penyimpangan teknis dan penyimpangannya	66
Bibliografi	76

Prakata

Pemanfaatan hidrogen diarahkan untuk bisa memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pemanfaatan energi bersih.

Standar Nasional Indonesia (SNI) ini dirumuskan dengan tujuan untuk melindungi konsumen dan pemasok terhadap aspek keselamatan dan keamanan penggunaan bahan bakar hidrogen dan mendukung perkembangan industri bahan bakar hidrogen di Indonesia. Standar Nasional Indonesia ini merupakan adopsi modifikasi dari ISO/TR 15916: 2004, *Basic considerations for the safety of hydrogen system*.

SNI ini disusun berdasarkan Pedoman Standardisasi Nasional Nomor 8 tahun 2007 tentang Penulisan Standar Nasional Indonesia.

SNI ini disusun oleh Panitia Teknis 27-04 Bioenergi melalui perumusan standar dan terakhir dibahas dalam Rapat Konsensus Panitia Teknis Bioenergi pada tanggal 3 Desember 2012 di Jakarta, yang dihadiri oleh anggota panitia teknis, perwakilan dari produsen, konsumen, pakar, pemerintah, dan pihak lain yang terkait. Standar ini juga telah melalui tahapan konsensus nasional, yaitu jajak pendapat pada 16 April 2013 sampai dengan 15 Juni 2013.

Deviasi standar ini dari ISO/TR 15916:2004 adalah penghilangan beberapa kalimat yang ditujukan agar pengguna lebih mudah dalam menerapkan standar ini. Deviasi ini terlampir dalam Lampiran F.

Pendahuluan
[Dihapus]



Dasar – dasar keselamatan bahan bakar hidrogen

1 Ruang lingkup

Standar ini menetapkan persyaratan keselamatan dan keamanan pemanfaatan hidrogen sebagai bahan bakar baik dalam bentuk cair maupun gas.

2 Acuan normatif

Dokumen acuan berikut sangat diperlukan untuk penerapan dokumen ini. Untuk acuan bertanggal, hanya edisi yang disebutkan yang berlaku. Untuk acuan tidak bertanggal, edisi terakhir dari dokumen acuan (termasuk amandemen) yang berlaku.

ISO 11114-4, *Transportable gas cylinders — Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents — Part 4: Test methods for selecting metallic materials resistant to hydrogen embrittlement*

ISO 14687:1999/Cor 1:2001, *Hydrogen fuel — Product specification*

3 Istilah dan definisi

Untuk tujuan penggunaan dalam dokumen ini, istilah dan definisi berikut yang digunakan.

3.1

kondisi sekitar

kondisi atmosfer standar internasional pada permukaan laut (temperatur 288 K dan tekanan absolut 101,323 kPa), atau kondisi sekitar yang ditunjukkan oleh temperatur dan tekanan pada lokasi tertentu

3.2

annealing

proses pemanasan yang digunakan untuk melunakkan baja keras sehingga dapat dibentuk dengan mesin atau dibentuk pada temperatur ruang

3.3

pemadaman nyala api

proses pembakaran yang dihentikan atau nyala api yang dipadamkan

3.4

penyalaan sendiri

fenomena di mana campuran gas, uap, kabut, debu, dan semprotan yang menyala secara spontan tanpa ada penyulut eksternal

3.5

temperatur penyalaan sendiri

temperatur terendah yang menyebabkan **penyalaan sendiri** (3.4)

3.6

penggantian gas-isi

proses penggantian gas yang tidak diinginkan dengan yang diinginkan

CATATAN Gas yang tidak diinginkan pertama kali dikeluarkan melalui pengosongan dengan pompa vakum, kemudian gas yang diinginkan diisikan.

3.7

aliran-balik

aliran fluida dengan arah yang berlawanan dari arah aliran normal

CATATAN Istilah ini digunakan untuk menjelaskan tentang masuknya (difusi) udara atmosferik ke dalam jalur ventilasi hidrogen.

3.8

katup bola

katup berbentuk bola

CATATAN 1 Kontrol aliran buka-tutup (*on-off*) dilakukan dengan memutar bola sebesar 90°.

CATATAN 2 Katup bola pengalih tersedia untuk membagi aliran dan aplikasi khusus lainnya.

3.9

gelombang ledak

gelombang tekanan kuat yang ditimbulkan oleh **gelombang kejut** (3.96) dan gas panas produk **deflagrasi** (3.24) hidrogen atau **detonasi** (3.27) yang mengenai udara lingkungan sekitar

3.10

tabung Bourdon

tabung lengkung berdinding tipis yang tertutup pada salah satu ujung dan tersambung dengan sumber tekanan pada ujung lainnya

CATATAN Perubahan tekanan menyebabkan perubahan lengkungan pada tabung Bourdon yang digunakan untuk mengindikasikan tekanan dalam sistem.

3.11

sistem berpasangan

sistem yang digunakan pada operasi yang berbahaya yang dilakukan oleh seseorang, sementara orang lain yang berada pada area aman melakukan observasi

CATATAN *Observer* disiapkan dengan baik (lengkap dengan pakaian, pelatihan, dll) untuk melakukan pertolongan pada petugas utama di area yang berbahaya, untuk mengantisipasi terjadinya bahaya.

3.12

gaya apung

gaya vertikal yang dikeluarkan pada suatu benda yang densitasnya lebih rendah dari gas hidrogen oleh gas statik di sekitarnya yang lebih berat, umumnya udara.

3.13

konverter katalitik

piranti berisi katalis yang digunakan untuk mengkonversi orto-hidrogen menjadi para-hidrogen dalam proses pencairan sehingga sebagian besar hidrogen cair yang diproduksi adalah para-hidrogen

CATATAN Beberapa katalis yang umum digunakan pada proses konversi ini adalah hidrat besi oksida, krom oksida pada partikel aluminium, dan senyawa berbasis nikel.

3.14**katup periksa**

katup satu arah yang beroperasi berdasarkan beda tekanan dan aliran hanya ke satu arah

3.15**code**

[Dihapus]

3.16**collimate**

membentuk jalur paralel atau disusun pada jalur yang lurus

3.17**pembakaran**

proses reaksi [termasuk api, **deflagrasi** (3.24) atau **detonasi** 3.27] oleh gas hidrogen, hidrogen cair atau padat yang teroksidasi, yang menghasilkan gas panas, panas, radiasi ultraviolet, dan kemungkinan gelombang tekanan ketika tertutup

3.18**komponen**

bagian dari peralatan atau sistem yang lengkap

3.19**ruang tertutup**

ruang yang biasanya terlarang oleh petugas

CATATAN Ruang tertutup mempunyai bukaan untuk keluar masuk yang terbatas atau dibatasi, mempunyai ventilasi yang kurang, dan dapat berisi atau menghasilkan udara tercemar yang berbahaya. Sehingga, ruangan ini tidak aman untuk dimasuki.

3.20**pengurungan**

pembatasan fisik, yang cukup untuk memengaruhi proses pembakaran

3.21**aliran konveksi**

gerakan atau sirkulasi fluida tanpa paksaan yang melibatkan perpindahan massa dari satu lokasi ke lokasi lainnya

cf. **konveksi alami** (3.72)

3.22**kriogenik**

keadaan pada temperatur yang sangat rendah (di bawah titik didih atmosferik, sekitar 120 K)

3.23**cryopumping**

proses yang terdiri atas pendinginan permukaan ke temperatur kurang dari 120 K sehingga gas dan uap terkondensasi pada permukaannya

CATATAN Proses ini digunakan sebagai pompa vakum.

3.24

deflagrasi

nyala api atau reaksi kimiawi yang bergerak melalui campuran yang dapat terbakar dengan laju kurang dari kecepatan suara pada campuran yang tidak terbakar

CATATAN Deflagrasi dikarakterisasi oleh kecepatan dalam ratusan meter per detik, pada keadaan tertutup yang menyebabkan peningkatan tekanan.

3.25

transisi deflagrasi-ke-detonasi

kejadian, sering disebabkan oleh turbulensi, dimana **deflagrasi** (3.24) yang mengawali terjadinya **detonasi** (3.27)

3.26

sistem pembanjiran

sistem penyemprotan air yang digunakan untuk menjaga peralatan, khususnya tangki/tabung penyimpanan hidrogen, agar tetap dingin pada saat terjadi kebakaran

3.27

detonasi

reaksi kimiawi eksotermik yang disertai dengan **gelombang kejut** (3.96) yang menyebar melalui campuran atau medium yang dapat meledak

CATATAN 1 Energi termal reaksi yang mendukung **gelombang kejut**, dan **gelombang kejut** mengompresi bahan yang tidak bereaksi, yang menghasilkan temperatur tinggi yang diperlukan untuk memicu reaksi.

CATATAN 2 Proses detonasi dikarakterisasi dengan kecepatan propagasi/penyebaran yang lebih besar daripada kecepatan suara pada campuran yang tidak terbakar.

3.28

sel detonasi

mekanisme dasar pelepasan energi di dalam **detonasi** (3.27)

CATATAN 1 Ruang yang tersusun dari gelombang akustik dan gelombang kejut yang bergerak ke belakang dan melintang terhadap gelombang kejut depan didefinisikan sebagai wilayah sel pembakaran yang coba diobservasi sebagai jalur berbentuk "sisik-ikan" pada kertas perak yang terpapar **detonasi**.

CATATAN 2 Lebar bentuk berlian yang menunjukkan ukuran sel, dan panjangnya secara empiris dapat dihubungkan dengan formula yang dapat memprediksi energi yang diperlukan untuk mengawali terjadinya **detonasi** dan dimensi fisik dari struktur yang menghalangi **detonasi**.

3.29

batas detonasi

konsentrasi maksimum dan minimum gas hidrogen, uap, kabut, semprotan atau debu dalam udara atau oksigen, yang memicu terjadinya **detonasi** (3.27)

CATATAN Batasan dikendalikan oleh ukuran dan geometri lingkungan, konsentrasi bahan bakar, dan cara terjadinya penyalaan.

3.30

deuterium

D₂

isotop hidrogen yang mengandung inti yang terdiri atas satu neutron dan satu proton

3.31**difusi**

fluks suatu fluida melalui materi lainnya

CONTOH Gerakan gas hidrogen melalui udara, atau gerakan gas hidrogen melalui dinding slang karet.

CATATAN Koefisien difusi merupakan massa materi yang berdifusi melalui satuan luas dalam satuan waktu pada satuan gradien konsentrasi.

3.32**pelarut pengencer**

komponen inert di dalam campuran gas yang mengurangi konsentrasi materi yang tertinggal (aktif)

3.33**daktilitas**

presentasi perenggangan material sampai rusak atau pengurangan luas penampang dari sampel uji keregangan (*tensile test*)

CATATAN 1 Bahan yang mempunyai nilai keregangan lebih besar dari 5% dari kerusakannya dianggap sebagai bahan yang kuat. Sedangkan yang memiliki nilai keregangan kurang dari 5% digolongkan sebagai bahan yang getas.

CATATAN 2 Material mungkin mengalami transisi kuat-ke-getas (*ductile-to-brittle*) pada temperatur rendah.

3.34**elektrolisis**

proses di mana arus listrik digunakan untuk menghasilkan reaksi kimiawi

CATATAN Pada air, contoh elektrolisis adalah pemisahan hidrogen dari oksigen.

3.35**elektroliser**

alat untuk elektrolisis

3.36**keadaan darurat**

keadaan yang tidak diharapkan, dan dapat membahayakan personil atau peralatan, yang membutuhkan reaksi cepat

3.37**emisivitas**

jumlah pancaran panas relatif yang dipancarkan oleh permukaan ketika dibandingkan dengan masa hitam pada temperatur yang sama

CATATAN Emisivitas pembakaran hidrogen/udara kecil jika dibandingkan dengan sumber panas lainnya, seperti kayu bakar.

3.38**entalpi**

sifat termodinamika materi yang ekuivalen dengan jumlah energi dalam dan produk dari tekanan dan volume

CATATAN Entalpi merupakan istilah yang digunakan sebagai pengganti “panas total” atau “kandungan panas”.

3.39

pengiringarusan

proses di mana aliran gas mendorong atau menarik butiran cairan jatuh pada aliran gas

CATATAN Proses ini perlu mendapat perhatian khususnya pada sistem ventilasi tangki penyimpan hidrogen cair, dan cenderung terjadi pada laju ventilasi yang cepat. Hal ini diharapkan tidak terjadi karena ekspansi volume cairan dapat mempengaruhi laju ventilasi, termasuk kemampuan ventilasi alat pelepas dan terjadi hilangnya cairan produk.

3.40

ledakan

ekuilibrium/kesetimbangan tekanan yang cepat antara area pelepasan energi (sistem) dan sekitarnya.

CATATAN Ledakan dapat terjadi melalui kegagalan mekanik tabung berisi fluida bertekanan tinggi (termasuk gas) atau melalui reaksi kimiawi yang cepat yang menghasilkan gas panas dalam volume yang besar (lihat **batas detonasi** 3.29).

3.41

fasilitas

bangunan atau peralatan yang digunakan untuk operasi khusus pada satu lokasi geografis

3.42

gagal-aman

kemampuan untuk menahan kegagalan tanpa menyebabkan kerusakan peralatan, kecelakaan pada personil, dan kehilangan waktu operasi

3.43

kelelahan

penurunan kemampuan secara gradual suatu bahan yang digunakan untuk bongkar muat secara berulang.

cf. **siklus beban** (3.67)

3.44

toleransi kegagalan ganda

desain sistem di mana kegagalan dua elemen untuk bekerja sesuai yang diharapkan tidak menyebabkan kegagalan seluruh sistem yang tidak diprediksi atau katastrofik

CATATAN Kegagalan yang mungkin terjadi pada dua area yang berhubungan atau dua area yang berfungsi sendiri, dan sistem harus tetap dapat berfungsi sesuai dengan yang diharapkan.

3.45

toleransi kegagalan tunggal

desain sistem di mana kegagalan satu elemen untuk bekerja sesuai yang diharapkan, tidak menyebabkan seluruh sistem berfungsi di luar yang diprediksikan atau katastrofik

CATATAN Sistem harus terus berfungsi sesuai dengan yang diharapkan.

3.46 Kebakaran

3.46.1

kebakaran

reaksi kimia cepat yang menghasilkan panas dan api

3.46.2

kebakaran

pembakaran berlanjut seperti ditunjukkan oleh adanya salah satu atau seluruhnya dari api, nyala/lidah api, panas, dan asap

3.46.3

kebakaran

nyala api stasioner dengan campuran bahan yang mudah terbakar dimasukkan ke dalam zona reaksi

CATATAN Nyala api hidrogen hampir tidak tampak di siang hari dan tidak disertai asap, kecuali adanya material lain yang ada dalam nyala api.

3.47

segitiga pembakaran

konsep visual yang menunjukkan persyaratan terjadinya pembakaran yaitu bahan bakar, okidator, dan sumber penyalaan sebagai tiga sisi segitiga, di mana pembakaran tidak dapat terjadi jika salah satu sisi tidak ada.

3.48 Nyala api

3.48.1

nyala api

zona pembakaran gas dan bahan yang tersuspensi berhubungan dengan pembakaran suatu substansi

3.48.2

nyala api

panas, umumnya cahaya pembakaran dari gas atau uap

CATATAN Nyala api dapat tetap terjadi pada campuran yang dapat terbakar yang memasuki zona reaksi, atau nyala api dapat menyebar melalui campuran yang dapat terbakar seperti pada **deflagrasi** (3.24).

3.49

udara panas

daerah reaksi kimia atau pembakaran (umumnya dalam rentang beberapa millimeter) yang memisahkan area terbakar dan tidak terbakar

3.50 Kemampuan terbakar (*flammability*)

3.50.1

kemampuan terbakar (*flammability*)

tingkat/derajat di mana bahan mudah terbakar di dalam oksidator udara

3.50.2

kemampuan terbakar (*flammability*)

konsentrasi bahan bakar di dalam oksidator dimana reaksi pembakaran tidak dapat dicegah.

cf. **batas kemampuan terbakar** (3.51)

3.51

batas kemampuan terbakar

konsentrasi uap bahan bakar terendah (LFL) dan tertinggi (UFL) dalam campuran yang dapat terbakar yang akan menyala dan memperbanyak nyala api

CATATAN 1 Batas-batas ini merupakan fungsi dari temperatur, tekanan, pengencer, dan energi penyalaan.

CATATAN 2 Batas-batas ini biasanya dinyatakan dalam persen (fraksi volume).

3.52

pemadaman suar bakar api

pemadaman nyala api hidrogen pada sistem suar bakar hidrogen, menyebabkan hidrogen yang tidak terbakar terlepas ke atmosfer

3.53

sel bahan bakar

alat elektrokimia yang mengubah energi kimiawi bahan bakar dan oksidator, yang dipasok dari luar, menjadi energi listrik dan produk samping termasuk panas

3.54

stres mekanik

kerusakan atau keretakan permukaan di mana dua bagian yang bergesekan menghasilkan panas dan menyebabkan keausan, yang selanjutnya menjadikan partikel menjadi longgar

CATATAN 1 Stres mekanik terjadi saat materi yang identik atau sama kekerasannya digeser atau dirotasikan sehingga terjadi kontak dengan lainnya.

CATATAN 2 Potensi stres mekanik meningkat pada material dengan komposisi dan kekerasan kimia yang sama.

3.55

penyerap

substansi yang menyerap gas pada tekanan rendah dengan proses absorpsi

CATATAN Penggunaan penyerap adalah untuk meningkatkan atau mempertahankan kevakuman pada sistem tertutup.

3.56

katup globe

katup dengan rongga berbentuk bulat dimana aliran lewat

CATATAN 1 Katup globe dapat dipertimbangkan sebagai katup serbaguna untuk mengendalikan *on-off* dan modulasi aliran. Katup ini memiliki hubungan linier antara persen aliran dan persen pembukaan lubang.

CATATAN 2 Terdapat tiga jenis utama katup "globe" yaitu globe, sudut, dan Y, yang perbedaan utamanya adalah pada orientasi dudukan arah aliran. Semua dikarakterisasi oleh penutupan (umumnya, sumbatan atau sumbatan runcing) yang melalui jalur tegak lurus pada dudukan katup. Sumbatan digunakan untuk menutup aliran pada dudukan katup dan mengendalikan aliran yang melalui batang katup. Sumbatan dilekatkan pada batang katup yang akan menonjol melalui bonet, yang menahan tekanan di dalam batang katup dan berisi *packing* untuk mencegah kebocoran media di sepanjang batang katup.

CATATAN 3 Katup ini juga dapat disebut sebagai katup batang geser karena sumbatan diletakkan dengan gerakan linier pada batang sumbatan katup.

3.57

pedoman

dokumen yang ditetapkan dari hasil salah satu anggota organisasi profesional yang berbeda dan berisi informasi teknis mengenai pelaksanaan dan prosedur yang aman

3.58

kekerasan

sifat komposit suatu material meliputi resistensi (daya tahan) terhadap lekukan, deformasi (perubahan bentuk), dan/atau abrasi

CATATAN Kekerasan diukur sebagai kekuatan hasil (*yield strength*), kekerasan kerja, daya rentang, modulus elastisitas, dan karakteristik material lainnya.

3.59

bahaya

keadaan atau potensi yang dapat menyebabkan atau berkontribusi bahaya terhadap seseorang, barang milik atau lingkungan

3.60

mekanisme transfer panas dan massa

deflagrasi penyebaran nyala api melalui proses di mana radiasi, gas panas, dan jenis kimia aktif bergerak ke area yang berdekatan dengan gas yang tidak terbakar

3.61

hidrida

senyawa yang mengandung hidrogen dan elemen lainnya

CATATAN Beberapa hidrida sedang diinvestigasi sebagai media penyimpan hidrogen yang potensial.

3.62

penggetasan hidrogen

perubahan-perubahan yang merusak pada sifat fisik logam yang terpapar hidrogen

3.63

menyalakan

menyebabkan pembakaran atau membawa api

CATATAN Proses ini meningkatkan titik nyala bahan ke titik penyalanya (temperatur minimum di mana bahan akan terbakar tanpa adanya penyebab panas dari luar).

3.64

energi penyalan

energi yang diperlukan untuk mulainya penalaran nyala api melalui campuran yang mudah terbakar.

3.65 Joule-Thomson

3.65.1

koefisien Joule-Thomson

koefisien yang berdasarkan pada efek Joule -Thomson.

cf. **efek Joule-Thomson** (3.65.2)

CATATAN Jika koefisien Joule-Thomson positif, gas yang berekspansi akan didinginkan dan jika negatif, gas yang berekspansi akan dipanaskan.

3.65.2

efek Joule-Thomson

pendinginan atau pemanasan yang terjadi ketika gas bertekanan tinggi berekspansi dengan tidak adanya kerja dari luar

3.66

aliran laminar

aliran partikel cairan pada jalur paralel aksis pipa dan tanpa komponen aliran radial

3.67

siklus beban

bongkar muat bahan secara berulang yang mengakibatkan stres yang berulang

cf. **kelelahan** (3.43)

CONTOH Pemberian dan pengurangan tekanan secara berulang pipa penyimpanan.

3.68

tekanan kerja maksimum yang diijinkan

MAWP

pengukuran tekanan maksimum yang diijinkan dalam bejana penyimpanan (di atasnya) atau sistem perpipaan pada temperatur yang tertentu

CATATAN 1 MAWP merupakan dasar penentuan tekanan pada alat pelepas tekanan yang melindungi sistem bejana atau perpipaan.

CATATAN 2 MAWP juga dapat merupakan nilai maksimum tekanan operasi yang diijinkan dari tangki tekan yang dibuat sesuai dengan standar tekanan untuk tangki.

3.69

fraktur logam

peregangan bahan logam ke tingkat yang memungkinkannya pecah atau menjadi renggang ke rapuh (*ductile-to-brittle*)

3.70

energi penyalaan minimum

MIE

energi minimum yang diperlukan untuk menyalakan campuran yang dapat menyala pada kondisi temperatur, tekanan, dan pengencer yang ada

cf. **energi penyalaan** (3.64)

3.71

massa molekular

total massa atom-atom dalam molekul

3.72

konveksi alami

gerakan partikel fluida yang disebabkan oleh gaya apung yang meningkat ketika terjadi pemanasan dan gradien densitas di dalam fluida

3.73**titik didih normal****NBP**

temperatur di mana cairan mendidih pada tekanan normal atmosferik sekitar (absolut 101,325 kPa)

3.74**senyawa NO_x**

senyawa nitrogen dengan oksigen yang dihasilkan dengan pembakaran bahan bakar dengan udara pada temperatur tinggi

3.75**temperatur dan tekanan normal****NTP**

temperatur 293,15 K dan tekanan absolute 101,325 kPa

3.76**orto-hidrogen (o-hidrogen)**

molekul hidrogen dimana putaran inti dari setiap atom di dalam molekul berotasi dengan arah yang sama (paralel)

3.77 Tekanan berlebih**3.77.1****tekanan berlebih**

(pada gelombang ledakan) tekanan di atas tekanan atmosfer

3.77.2**tekanan berlebih**

(dalam struktur tertutup) tekanan yang melebihi tekanan kerja maksimum yang diijinkan pada suatu struktur tertutup

3.78**parahidrogen (p-hidrogen)**

molekul hidrogen di mana rotasi perputaran nuklir atom individu dalam molekul yang berotasi dengan arah berlawanan (antiparalel)

3.79**penyerapan**

penyebaran (melalui difusi) atau melalui aliran, atau melewati permukaan atau celah bahan

3.80**permeabilitas**

laju difusi gas bertekanan melalui materi berpori

3.81**sistem fotovoltaik**

alat yang dapat menghasilkan listrik berdasarkan paparan radiasi elektromagnetik, termasuk radiasi matahari

3.82**deformasi plastik**

deformasi permanen yang terjadi pada bahan elastis ketika bahan tersebut diregangkan melebihi batas elastisitasnya

3.83

regulator tekanan

alat yang digunakan pada sistem untuk mengatur tekanan pada nilai tertentu

CATATAN Regulator mengkonversi variasi input tekanan tinggi ke tekanan konstan yang lebih rendah.

3.84

alat pelepas tekanan

alat keselamatan dasar yang digunakan untuk mencegah tekanan di dalam sistem melebihi **MAWP** (3.68)

CATATAN 1 Alat ini dipasang sehingga tekanan berlebih di dalam struktur tertutup dapat dikurangi sebelum terjadi kerusakan pada struktur tertutup tersebut.

CATATAN 2 Alat pelepas tekanan umumnya berupa katup beban pegas (*spring-loaded valve*) yang akan terbuka pada tekanan atau temperatur yang ditentukan, atau piringan yang berisi membran akan pecah pada tekanan yang ditentukan.

3.85

protium

isotop hidrogen dengan satu proton

CATATAN Protium merupakan unsur utama molekul hidrogen.

3.86

sel bahan bakar PEM

sel bahan bakar jenis membran penukar proton

sel bahan bakar jenis elektrolit polimer

sel bahan bakar (3.53) yang menggunakan membran resin sebagai pengganti ion positif padat sebagai elektrolit

3.87

pembersihan

proses yang digunakan untuk menghilangkan pengotor

CATATAN Sebagai contoh, sebelum memasukan hidrogen ke dalam sistem, udara di dalam sistem dikeluarkan untuk mencegah pembentukan campuran yang mudah terbakar di dalam sistem.

3.88

Q-D

jarak kuantitas

hubungan antara jumlah materi yang dapat terbakar atau meledak dan jarak pemisahan dari objek yang dapat terpapar untuk menentukan jenis proteksi

CATATAN 1 Hubungan ini didasarkan pada tingkat risiko yang dipertimbangkan untuk menentukan paparan yang ditabulasikan dalam tabel Q-D yang tepat.

CATATAN 2 Hubungan ini termasuk jarak pemisahan untuk pengoperasian fasilitas secara aman, dengan jalan raya dan lainnya, dan jumlah total energi material dapat berinteraksi pada lokasi yang diberikan.

CATATAN 3 Pendekatan dari aspek keselamatan umumnya digunakan untuk penggunaan hidrogen di ruang angkasa dan aplikasi militer.

3.89

memadamkan

mengakhiri reaksi kimia atau perambatan nyala api

3.90**jarak pemadaman**

jarak yang diperlukan untuk mencegah perambatan nyala api terbuka yang melalui campuran bahan bakar/udara yang dapat terbakar

3.91 Celah pemadaman**3.91.1****celah pemadaman**

celah antara elektroda pencetus api antara dua elektroda parallel dimana penyalaan campuran bahan bakar/udara yang dapat terbakar dapat ditekan.

CATATAN Celah yang lebih kecil akan menekan terjadinya penyalaan api.

3.91.2**celah pemadaman**

[Dihapus]

3.92**redundansi**

penggunaan lebih dari satu alat oleh lembaga independen dalam mengerjakan suatu fungsi tertentu

3.93**reformer**

alat untuk mensuplai hidrogen yang berasal dari bahan bakar lain

3.94**penyalaan resonansi**

penyalaan campuran yang dapat terbakar sebagai hasil **gelombang kejut** (3.96) yang berulang yang dapat terjadi selama aliran pada sistem perpipaan

CATATAN Osilasi akustik dalam ruang resonansi dapat menyebabkan peningkatan temperatur secara cepat, laju peningkatan menjadi lebih cepat dan nilai yang lebih tinggi, jika terdapat partikel atau kecepatan gas yang tinggi.

3.95**risiko**

paparan terhadap kemungkinan terjadinya cedera atau kerugian sebagai mana diterapkan pada keselamatan

CATATAN Risiko merupakan fungsi dari frekuensi kemungkinan kejadian yang tidak diharapkan, potensi keparahan dari akibat yang dihasilkan, dan ketidakpastian yang berhubungan dengan frekuensi dan keparahan.

3.96**gelombang kejut**

gelombang kompresi dengan amplitudo-besar dimana terjadi perubahan yang cepat dan besar pada densitas, tekanan, dan kecepatan partikel

CATATAN Gelombang kejut dapat disebabkan oleh benturan kuat, ledakan, atau dampak yang keras. Transmisi energi berikutnya berpindah sebagai gelombang dengan kecepatan yang lebih besar dari kecepatan suara relatif terhadap bahan yang tidak terganggu.

3.97

materi lunak

material non-logam

CONTOH Polimer, pelapis (*Coating*), atau pelumas.

CATATAN Sebagai contoh, pada katup, istilah material lunak mengacu pada barang-barang seperti penyekat (*seal*), dudukan dan cincin-O.

3.98

berat jenis

rasio densitas material terhadap densitas material standar seperti air

3.99

kapasitas panas spesifik

c

jumlah panas (energi) yang diperlukan untuk mengubah temperatur dari suatu unit massa bahan sebesar satu derajat pada tekanan atau volume konstan

3.100

standar

[Dihapus]

3.101

campuran stoikiometrik

campuran reaktan di dalam suatu reaksi kimia dengan mengoptimalkan produksi dari produk reaksi

3.102

lapisan aliran

aliran fluida yang melalui slang atau pipa di mana fase cair dari suatu fluida mengalir di bagian bawah slang atau pipa dengan sedikit pencampuran dengan fase uap yang mengalir di atas fase cairan

CATATAN Jenis aliran ini terjadi ketika laju aliran penguapan relatif rendah.

3.103

stres

gaya internal per unit area yang terjadi pada benda ketika benda tersebut dikenakan pada sistem gaya eksternal atau perubahan temperatur tidak seragam

3.104

sistem

susunan komponen di mana hidrogen dikirimkan, disimpan dan digunakan

CATATAN 1 Sistem dapat meliputi komponen seperti bejana penyimpanan, pemipaan, katup, alat pelepas tekanan, pompa, subsistem vakum, persambungan dan pengukur.

CATATAN 2 Sistem dapat ditujukan untuk area baru, fasilitas baru pada suatu area, dan instalasi baru pada suatu fasilitas.

3.105

pecah tarik

keadaan yang terjadi saat material diberikan beban tarik sampai material tersebut mengalami patah atau retak

3.106**konduktivitas termal**

laju perpindahan panas per satuan luas dari suatu bahan dibagi dengan gradien temperatur yang menyebabkan perpindahan panas

CATATAN Konduktivitas termal biasanya bergantung pada temperatur, yaitu memiliki variasi temperatur.

3.107**radiasi termal**

radiasi elektromagnetik yang berasal dari bahan sebagai akibat pengaruh temperaturnya

CATATAN Dari perspektif manusia, ini adalah radiasi panas.

3.108**tritium**

T_3

isotop hidrogen yang memiliki dua neutron dan jumlah massa tiga

3.109**turbulensi**

keadaan aliran di mana komponen radial atau arus pusaran keluar bersamaan dengan gerakan fluida parallel terhadap sumbu pipa

3.110**ruang kosong**

volume tangki penyimpanan yang tidak terisi penuh cairan

CATATAN Ruang kosong ini biasanya minimum 10% dari volume tangki.

3.111**jaket-vakum**

isolasi termal menggunakan teknik konstruksi dinding ganda di mana ruangan antara dua dinding dikosongkan, yang menghasilkan ruang vakum antara dinding bagian dalam dan dinding bagian luar.

CATATAN Dinding bagian luar konstruksi dinding ganda umumnya disebut dengan jaket vakum.

3.112**Viscosity**

[Dihapus]

4 Penggunaan hidrogen**4.1 Infrastruktur dasar hidrogen****4.1.1 Kategori infrastruktur**

Infrastruktur hidrogen dapat dikategorikan penggunaannya sebagai berikut:

- produksi,
- penyimpanan dan transportasi, dan
- penggunaan hidrogen.

4.1.2 Produksi

Produksi hidrogen dalam jumlah besar melibatkan banyak proses kimia, seperti proses reformasi uap (*steam reforming*) gas alam, pemindahan hidrogen dari asam-asam dengan logam-logam serta elektrolisa air. Hidrogen dapat juga dihasilkan dari proses fotokimia dan tumbuhan yang dirancang secara genetik.

4.1.3 Penyimpanan dan transportasi

4.1.3.1 Umum

Hidrogen yang diproduksi untuk digunakan di suatu tempat harus diproses menjadi bentuk yang siap disimpan dan ditransportasikan ke peralatan pengguna. Dibandingkan bahan bakar minyak, hidrogen yang mempunyai densitas rendah pada kondisi sekitar dan titik didih yang rendah, membuat penyimpanannya sangat sukar dalam jumlah yang besar memerlukan penanganan khusus untuk penggunaannya.

Metode penyimpanan hidrogen yang sudah terbukti untuk meningkatkan densitas penyimpanannya yaitu penanganan hidrogen sebagai gas bertekanan atau dicairkan pada temperatur rendah. Metode pengiriman/transportasi hidrogen dapat dilakukan menggunakan transportasi darat, transportasi air, atau melalui pipa. Hidrogen yang diijinkan untuk dikirim melalui pesawat terbang komersial hanya dalam jumlah yang sangat kecil. Sistem perpipaan untuk transportasi hidrogen juga dapat digunakan di sektor industri. Di masa lalu hidrogen digunakan secara luas sebagai komponen gas kota hasil dari gasifikasi batubara yang dialirkan untuk penerangan jalan. Saat ini hidrogen umumnya tidak didistribusikan melalui pipa untuk keperluan komersial atau umum.

4.1.3.2 Penyimpanan dan transportasi

Jika diperlukan hidrogen pada fase gas dalam jumlah kecil hingga sedang, gas hidrogen perlu ditekan dan disimpan pada bejana bertekanan tinggi. Tangki penyimpanan dari aluminium dan baja umumnya dapat digunakan untuk menyimpan hidrogen hingga tekanan 40 MPa. Tabung penyimpan hidrogen didesain khusus untuk pengangkutan darat dengan truk trailers dengan kapasitas tabung antara 300 000 sampai dengan 500 000 liter.

4.1.3.3 Penyimpanan dan transportasi hidrogen cair

Metode lain untuk penyimpanan hidrogen adalah dengan mengkondensasikan hidrogen menjadi fase cair atau *slush* (campuran hidrogen padat dan cairan). Pada kondisi ini, hidrogen didinginkan ke temperatur kriogenik (sekitar 20 K) agar menjadi fase cair, dan dengan temperatur di bawah 14 K untuk menjadi berbentuk *slush*.

Guna menjaga hidrogen sebagai cairan kriogenik dalam penyimpanan, harus diminimalkan kontak dengan panas sekitar agar tidak terjadi kehilangan hidrogen yang berlebihan. Isolasi panas pada kontainer direkomendasikan dengan menggunakan selubung vakum. Pada sistem penyimpanan yang tidak dilengkapi dengan penangkapan dan pencairan kembali, kebocoran hidrogen yang rendah ke lingkungan masih dapat diterima jika laju penggunaannya tidak melebihi laju pendidihan atau ada pengaturan *boil-off*.

4.1.3.4 Pilihan penyimpanan lain

Senyawa kimia yang kaya dengan ikatan hidrogen, hidrogen dicampur dengan bahan bakar lain, hidrida, dan material dengan penyerapan permukaan hidrogen yang tinggi, dapat diaplikasikan pada sistem penyimpanan hidrogen (lampiran D).

Reformer dapat digunakan untuk memperoleh hidrogen dari senyawa penyimpan. Pada sistem reformer yang menggunakan bahan kimia selain hidrogen, pertimbangan khusus untuk keselamatannya perlu diperhatikan yang tidak termasuk dalam lingkup standar ini.

4.1.3.5 Sistem penyimpanan pada kendaraan

Volume hidrogen dan massa bejana tertutup untuk gas bertekanan tinggi atau untuk sistem *kriogenik* merupakan tantangan dalam perancangan sistem penyimpan hidrogen pada kendaraan. Untuk mengurangi volume dan massa tangki bahan bakar pada kendaraan berbahan bakar hidrogen, dikembangkan material komposit ringan. Untuk kendaraan sel bahan bakar, dapat digunakan tangki bahan bakar yang bertekanan sampai 35 Mpa. Teknologi penyimpanan hidrogen dengan tekanan sampai 70 MPa dengan material composite terus dikembangkan.

4.1.4 Aplikasi penggunaan hidrogen

Aplikasi penggunaan hidrogen meliputi antara lain untuk sel bahan bakar, mesin-bakar internal, pelontar roket, dan aplikasi yang menggunakan komponen-komponen tersebut. Aplikasi energi berbasis elektrolisis dan sistem sel bahan bakar hidrogen telah tersedia secara komersial.

Sistem *portable* kecil, dirancang untuk menggantikan baterai standar seperti tipe "D" cell 1 kW hingga 10 kW, dan sistem yang lebih besar dirancang untuk sistem pendistribusian energi yang diperlukan untuk rumah tangga, desa terpencil, perumahan, atau untuk peningkatan daya pada jaringan listrik, sistem cadangan energi untuk *base transceiver station* (BTS) operator telepon selular. Sistem portabel digunakan dengan penyediaan hidrogen yang dapat diganti atau diisi ulang. Sistem portabel yang lebih besar digunakan melalui sistem yang terintegrasi dengan sumber energi terbarukan, seperti pembangkit energi angin atau sistem fotovoltaiik.

Sistem penghasil dan pengguna hidrogen prinsipnya mengubah listrik menjadi hidrogen, menyimpan energi dalam suatu media dan mengubah kembali menjadi listrik ketika diperlukan, dengan menggunakan elektroliser.

4.2 Komponen umum dalam sistem hidrogen

4.2.1 Umum

Umumnya pada sistem hidrogen, terdapat komponen utama dan pendukung yang terintegrasi dengan keselamatan hidrogen. Contoh komponen utama sistem hidrogen antara lain pelontar roket dalam motor roket untuk aplikasi kedirgantaraan, sel tumpuk (*cell stacks*) pada sel bahan-bakar untuk aplikasi energi, mesin pembakaran internal untuk aplikasi transportasi, dan konverter katalitik pada kompor untuk aplikasi rumah tangga.

Komponen tambahan yang mendukung fungsi utama sistem hidrogen terdiri dari semua atau beberapa proses berikut:

- penyimpan hidrogen atau sumber hidrogen, dan penyimpan oksidator atau sumber oksidator;
- saluran fluida yang menghubungkan hidrogen dan oksidator ke reaktor;
- pengendali aliran;
- sistem pelepas tekanan yang merupakan bagian dari perancangan komponen a), b), dan c);

- e) komponen pendeteksi.

4.2.2 Bejana penyimpan

Rancangan dan fungsi bejana penyimpan dan komponennya harus dapat merefleksikan aplikasinya, seperti bejana gas bertekanan tinggi atau bejana cair kriogenik. Bejana dengan volume lebih dari 7 500 liter dalam kondisi standar harus diletakkan di luar ruang atau di dalam ruang dengan dirancang secara khusus. Konstruksi bejana harus memenuhi standar yang ditetapkan. Bejana penyimpan yang berisi hidrogen kriogenik harus menggunakan isolasi khusus atau selubung vakum. Kevakuman harus dijaga dengan menggunakan pompa vakum.

4.2.3 Saluran fluida, pemipaan, sambungan dan seal

Pemipaan dan seal yang digunakan harus sesuai dengan peruntukan bagi hidrogen, sesuai dengan umur pakai sistem. Secara umum pemipaan menggunakan material *stainless-steel*. Hidrogen dapat meresap pada sebagian besar jenis material, bahkan dapat bocor melalui celah kecil pada sistem. Penggunaan sambungan dengan pengelasan dapat dipilih untuk mengatasi kebocoran yang tidak dapat ditolerir. Jika suatu sambungan atau seal perlu dibuka secara rutin, diperlukan adanya detektor gas hidrogen atau detektor kebakaran, untuk mencegah terjadinya kebakaran.

4.2.4 Pengendali aliran

Berbagai komponen digunakan untuk mengendalikan aliran hidrogen di dalam sistem. Katup, katup searah (*check valves*), dan regulator merupakan beberapa komponen yang umum digunakan. Komponen-komponen ini dapat dioperasikan secara manual atau dengan kontrol jarak jauh menggunakan aktuator elektrik atau pneumatik. Aktuator harus dirancang khusus agar tidak menjadi sumber penyalaan api pada saat hidrogen dikeluarkan. Katup searah digunakan untuk mencegah aliran balik. Regulator digunakan untuk mengendalikan tekanan fluida di dalam sistem. Pengendali aliran juga meliputi sensor fluida seperti penunjuk tekanan, pengukur aliran, indikator level cairan, dan sistem kendali lainnya.

4.2.5 Sistem pelepas tekanan

Pada bejana tekan dan perpipaan yang digunakan untuk hidrogen harus dilindungi dari terjadinya tekanan berlebih dengan sistem pelepas tekanan. Contoh kasus yang dapat menyebabkan terjadinya tekanan berlebih pada sistem hidrogen adalah kebakaran atau kerusakan pada regulator sehingga hidrogen bertekanan tinggi masuk ke sistem yang dirancang bertekanan rendah.

Sistem pelepas tekanan biasanya menggunakan katup pelepas tekanan dan cakram pemencar aliran yang mengarahkan hidrogen bertekanan secara langsung menuju sistem ventilasi. Katup pelepas tekanan memiliki seal yang dilengkapi pegas, yang akan terbuka apabila tekanan melebihi batas tekanan yang ditentukan. Cakram pemencar aliran berfungsi seperti katup pelepasan tekanan, tetapi pelepasan tekanan terjadi akibat pecahnya diafragma yang sensitif terhadap tekanan. Alat ini biasanya digunakan secara paralel dengan katup pelepas tekanan sebagai prosedur gagal-aman (*fail-safe*) pada keadaan tekanan berlebih. Cakram pemencar aliran harus diganti apabila sudah pecah. Rongga kosong pada jalur selubung vakum pada sistem *kriogenik* harus dilindungi dari kerusakan yang dapat menyebabkan terjadinya tekanan hidrogen berlebih.

4.2.6 Komponen pendeteksi

Di luar sistem hidrogen, sistem kendali harus dapat memonitor adanya gas hidrogen, atau api yang disebabkan oleh adanya kebocoran gas hidrogen. Berbagai jenis teknologi tersedia untuk mendeteksi gas hidrogen. Detektor hidrogen biasanya diletakkan di atas titik yang diperkirakan dapat terjadinya kebocoran hidrogen dan pada saluran masuk dari cerobong ventilasi. Kamera infra merah dapat digunakan untuk pencitraan panas di area yang luas. Detektor UV digunakan secara spesifik untuk mendeteksi nyala api yang disebabkan oleh hidrogen. Untuk penggunaan detektor UV, sensornya harus diletakkan secara paralel pada permukaan objek karena cahaya matahari atau pengelasan dapat memicu bekerjanya detektor ini.

4.2.7 Komponen lain

Sistem hidrogen dapat menggunakan katalitik konverter dan penyerap yang berfungsi untuk membuang kelebihan hidrogen. Penyaring juga dapat digunakan untuk membuang kotoran dari hidrogen pada sistem atau dari pendukung sistem. Sebagai contoh, tumpukan membran penukar proton (*proton exchange membrane/ PEM*) yang digunakan pada sistem elektrolisis dan sel bahan bakar membutuhkan air murni yang difiltrasi dan deionisasi secara teliti. Alat penukar panas, pendingin, dan radiator mungkin diperlukan pada sistem hidrogen.

4.2.8 Pertimbangan untuk kondisi eksternal sistem

Hal-hal yang perlu diperhatikan pada perancangan sistem hidrogen antara lain:

- a) Kondisi dimana sistem beroperasi,
- b) Operasi gagal aman (*fail-safe*) yang memperhitungkan berbagai potensi kegagalan,
- c) Rencana jangka panjang, meliputi umur operasional sistem.

Sistem hidrogen yang permanen harus memenuhi persyaratan standar keselamatan nasional yang ditetapkan. Standar ini mengidentifikasi konstruksi dan material yang diperlukan untuk struktur, berdasarkan jumlah hidrogen, baik dalam fase gas atau cair, dan lokasi penyimpanan hidrogen yang direncanakan. Rancangan hidrogen harus memperhitungkan seluruh kemungkinan dan mengantisipasi semua keadaan selama umur operasi, dan harus mendesain sistem dalam keadaan aman dari setiap kegagalan yang diperkirakan dapat terjadi.

4.3 Bahan bakar hidrogen

Bahan bakar hidrogen dapat mengandung pengotor yang tertinggal selama proses produksi atau yang timbul ketika penyimpanan atau penanganan setelah proses produksi. Jumlah dan jenis-jenis pengotor dapat berpengaruh negatif pada sistem pemanfaatan hidrogen.

Untuk menspesifikasi karakteristik kualitas bahan bakar hidrogen, dan memastikan keseragaman produk bahan bakar hidrogen yang dihasilkan untuk kendaraan, perkakas, atau aplikasi lain pengisian bahan bakar, dapat mengacu pada ISO 14687:1999/Cor:2001 mengenai karakteristik mutu bahan bakar hidrogen.

Spesifikasi ini mengklasifikasikan bahan bakar hidrogen menjadi tiga jenis, yaitu: jenis I untuk gas, jenis II untuk cair, dan jenis III untuk *slush*. Selanjutnya, jenis I dibagi menjadi *grade* A, B, dan C untuk mengklasifikasikan tingkat kemurnian. Semakin tinggi kemurnian, maka biaya penyimpanan dan penanganan akan semakin tinggi. ISO 14687:1999/Cor:2001 menentukan tingkat impuriti (H_2O), hidrokarbon total (THC), oksigen (O_2), argon (Ar), nitrogen (N_2), helium (He), karbon dioksida (CO_2), karbon monoksida (CO), merkuri (Hg), sulfur (S), dan partikulat permanen.

4.4 Pengaruh terhadap lingkungan

Pengaruh terhadap lingkungan yang timbul akibat penggunaan sistem hidrogen harus diminimalkan. Pengecualian sangat sedikit produk reaksi hanya berupa air murni. Pengecualian tersebut berupa sistem sirkulasi udara yang jika membakar hidrogen pada temperatur tinggi dapat menimbulkan nitrogen oksida (NO_x). Sistem sel bahan-bakar PEM dan elektroliser hanya memproduksi air, dimana sebagian sistem ini dapat menangkap air hasil reaksi dan digunakan kembali. Ke depan, jika transportasi berbahan bakar hidrogen menjadi dominan, maka daerah-daerah dengan penggunaan hidrogen yang tinggi, seperti di kota dapat mengalami peningkatan kelembaban atau kendaraan berbahan bakar hidrogen perlu dilengkapi peralatan untuk mengkondensasi dan menangkap emisi air. Tidak adanya polutan (CO , CO_2 , dan NO_x) sebagai produk samping merupakan keuntungan dalam penggunaan sistem hidrogen.

5 Persyaratan keselamatan penggunaan hidrogen gas dan cair

5.1 Persyaratan umum

Sifat hidrogen yang unik, menjadikannya berfungsi sebagai pembawa energi atau bahan bakar. Diperlukan perancangan dan pengoperasian yang tepat agar terhindar dari bahaya yang tidak diharapkan.

Kombinasi sifat hidrogen dan atribut khusus sistem hidrogen menentukan sifat alami dari potensi bahaya yang dihadapi oleh operator. Sistem yang beroperasi dengan hidrogen bertekanan tinggi atau pada temperatur kriogenik menentukan sifat alamiah dari potensi bahaya.

Bahaya utama yang berkaitan dengan sistem hidrogen dan harus diperhatikan pada saat perancangan, dapat dikategorikan dan diurutkan sebagai berikut:

- a) Pembakaran;
- b) Tekanan;
- c) Temperatur rendah;
- d) Penggetasan hidrogen;
- e) Pemaparan.

Setiap orang yang terlibat dalam penggunaan hidrogen harus memahami sifat-sifat yang berkaitan dengan keselamatan hidrogen dan bahaya yang ditimbulkan dari sifat-sifat tersebut.

5.2 Bahaya terkait dengan sifat hidrogen

5.2.1 Umum

Beberapa sifat hidrogen yang berkaitan dengan keselamatan umum dari hidrogen dapat diketahui dari sifat hidrogen dalam fasa gas dan cair.

5.2.2 Gas hidrogen

Hidrogen dalam bentuk gas tidak berwarna dan tidak berbau. Hidrogen merupakan molekul paling ringan dan paling kecil dibandingkan gas lainnya. Sebagai akibatnya gas hidrogen mudah meresap ke dalam material, menembus celah-celah kecil dan berdifusi dengan cepat pada media lingkungan tersebut, serta memiliki gaya apung terbesar dibandingkan dengan gas lain. Konsekuensi yang timbul dari sifat-sifat ini hidrogen yang terlepas cepat naik dan berdifusi dengan cepat, tetapi jika di dalam ruang tertutup hidrogen dapat berkumpul pada titik yang tinggi.

Sistem bejana dan perpipaan hidrogen memerlukan penyekat dan pencegah kebocoran yang baik. Kebocoran hidrogen yang tidak mengeluarkan desis, sulit dideteksi tanpa alat bantu. Hidrogen dapat meresap pada material secara perlahan di tempat yang tertutup. Kecepatan meresap bervariasi untuk jenis material yang berbeda. Untuk logam seperti baja pada temperatur sekitar, laju peresapan sangat rendah dengan jumlah yang tidak signifikan pada periode waktu yang lama. Penggunaan material polimer yang memungkinkan terjadinya peresapan dan akumulasi hidrogen dalam jumlah yang cukup besar, jika hidrogen masuk ke ruang kecil yang tidak berventilasi, harus mendapat perhatian yang hati-hati. Gas Hidrogen yang terlarut di dalam cairan dapat meresap ke dalam sambungan material bejana. Hidrogen memiliki densitas yang rendah pada keadaan sekitar, sehingga penyimpanan dan transportasi gas hidrogen dilakukan pada tekanan tinggi.

5.2.3 Hidrogen cair

Hidrogen cair berwarna bening kebiruan memiliki titik didih sangat rendah, densitas yang rendah, kapasitas panas rendah, dan ekspansi volumetrik besar jika dipanaskan menjadi gas. Hidrogen cair memiliki titik didih 20,3 K, akan menguap dengan cepat menjadi gas pada temperatur lingkungan sekitar (300 K). Memanaskan hidrogen cair untuk menjadi gas pada temperatur sekitar dapat menghasilkan tekanan yang sangat tinggi.

Konsekuensi lain dari hidrogen cair pada temperatur rendah, kecuali untuk helium, semua gas akan terkondensasi dan tersolidifikasi apabila terpapar dengan hidrogen. Kebocoran udara, nitrogen, atau gas lainnya yang melewati seal katup dan langsung terpapar dengan hidrogen cair, dapat menimbulkan beberapa bahaya. Gas yang tersolidifikasi dapat menyebabkan penyumbatan pada pipa, orifis, serta terganggunya fungsi katup. Pengurangan volume gas yang terkondensasi dapat menyebabkan kevakuman sehingga lebih banyak gas lain mengalir masuk, yang dikenal dengan proses *cyropumping*. Jika kebocoran terjadi dalam waktu yang lama, sejumlah besar material dapat terakumulasi dan menggantikan hidrogen cair. Untuk pemeliharaan sistem hidrogen, sebaiknya dihangatkan secara periodik, sehingga material-material yang beku dapat berubah kembali menjadi gas, yang memungkinkan terjadinya tekanan tinggi atau campuran yang mudah terbakar.

Bagian luar dari sistem hidrogen cair, pipa dan bejana tekan yang berisi hidrogen cair yang tidak diisolasi dapat mengkondensasikan gas seperti udara menjadi bentuk padat dan cair pada permukaan luarnya. Cairan kondensat akan mengalir dan terlihat seperti air. Bahaya kebakaran dan ledakan dapat terjadi apabila oksigen di dalam udara bersentuhan dengan material-material yang mudah terbakar.

5.3 Faktor-faktor yang terkait bahaya pembakaran

5.3.1 Aspek-aspek pembakaran

Bahaya utama sistem hidrogen adalah kebakaran tak terkendali akibat kebocoran. Tingginya potensi kebocoran dan pembentukan campuran mudah terbakar, kemudahan penyalaan

campuran hidrogen, dan potensi pelepasan sejumlah besar energi, dapat menyebabkan kebakaran atau ledakan.

Untuk dapat terbakar, bahan bakar (hidrogen) memerlukan oksidator seperti udara, dan sumber penyalaan. Campuran hidrogen dengan oksidator sangat mudah terbakar pada rentang konsentrasi, tekanan, dan temperatur yang lebar. Campuran ini dapat menyala pada perbandingan yang mendekati stoikiometri. Berbagai proses fisik (seperti nyala api, permukaan yang panas, gesekan, dll), termasuk listrik statis yang umumnya tidak dirasa oleh manusia, bisa berfungsi sebagai sumber penyalaan. Umumnya metode untuk mengurangi resiko kebakaran hidrogen berdasarkan pada pemisahan hidrogen dari oksidator.

Beberapa jenis pembakaran hidrogen yaitu kebakaran pada titik sumber, deflagrasi, dan detonasi. Setiap jenis pembakaran tersebut dapat menimbulkan potensi bahaya tergantung besarnya hidrogen yang terpapar pada oksidator.

Pada kebanyakan aplikasi, udara merupakan oksidator yang paling umum. Peralatan-peralatan khusus seperti elektroliser dan sistem *fuel-cell* berpotensi mencampurkan oksigen murni atau yang kaya-oksigen dengan hidrogen. Data sifat-sifat pembakaran hidrogen disajikan pada lampiran B.

5.3.2 Kebakaran

Kebakaran dari hidrogen yang berasal dari kebocoran, dapat terjadi ketika hidrogen yang tercampur dengan oksidator seperti udara dinyalakan menghasilkan api seperti pada pembakar Bunsen. Nyala api yang timbul dapat terjadi dalam rentang yang sangat besar, dari nyala api lilin hingga nyala api mesin jet, tergantung dari laju kebocoran hidrogen. Apabila kebakaran terjadi pada daerah tertutup, dapat mengakibatkan terjadinya kenaikan tekanan. Terdapat perbedaan yang sangat jelas, jika pembakaran hidrogen dibandingkan dengan pembakaran hidrokarbon seperti bensin. Jika sebagian besar radiasi yang dihasilkan dari pembakaran hidrokarbon berupa cahaya dan panas, nyala api pembakaran hidrogen menghasilkan radiasi dengan sedikit panas, tidak kasat mata, dan memancarkan radiasi ultraviolet, yang dapat mengakibatkan seperti terbakar cahaya matahari. Cahaya yang melewati gradien panas pada nyala api terkadang dapat menghasilkan bayangan.

Kebakaran hidrogen dapat terjadi, jika seluruh komponen segitiga api terpenuhi. Panas yang dihasilkan dari kebakaran hidrogen yang tidak terkendali dapat sangat merusak lingkungan sekitar. Pada area yang tertutup, api dari campuran hidrogen/udara, dapat menghasilkan tekanan hingga 8 kali lebih besar dari tekanan awal pada keadaan stoikiometrik. Dari perspektif keselamatan, konsekuensi yang harus diperhatikan dari pembakaran hidrogen selain pelepasan energi dan gas panas yaitu pembakaran hidrogen hampir tidak terlihat secara visual di bawah cahaya buatan atau cahaya siang hari. Sama halnya dengan persepsi fisik manusia bahwa panas tidak terjadi sampai ada kontak langsung dengan gas pembakaran. Kegiatan di dekat nyala hidrogen juga harus memperhatikan adanya pemaparan sinar UV. Dalam keadaan tidak ada peralatan deteksi, indikasi pertama kemungkinan adanya nyala api biasanya adalah dari suara mendesis kebocoran gas dan adanya bayangan yang terbentuk dari perbedaan panas nyala api.

5.3.3 Ledakan

5.3.3.1 Umum

Ketika campuran hidrogen dan oksidator dinyalakan, nyala api yang terjadi akan bergerak secara cepat menuju zona mampu-bakar. Nyala api ini dapat terbakar dengan dua jenis proses, yaitu deflagrasi atau detonasi. Kedua proses ini dapat dikategorikan sebagai ledakan. Gelombang kejut dan gas bertemperatur tinggi di daerah sekitar zona mampu-

bakar juga dapat disebut sebagai gelombang ledak. Pada gelombang ledak tidak terjadi pembakaran, tetapi mengalirkan gas-gas yang terdapat pada lingkungan dan material. Secara fisik, gelombang ledak tidak bisa membedakan antara deflagrasi dan detonasi.

5.3.3.2 Deflagrasi gas

Deflagrasi adalah nyala api yang merambat melalui media mampu-bakar dengan laju sedikit di bawah kecepatan suara pada media yang tak-terbakar. Kriteria penyalaan sama dengan kriteria pada kebakaran. Permukaan pipa atau dinding bejana dapat menyebabkan kenaikan tekanan dan peningkatan kecepatan api hingga ratusan meter per detiknya, yang dikenal dengan percepatan api. Apabila kecepatan nyala api yang tinggi dalam keadaan turbulen, proses deflagrasi dapat berubah menjadi proses detonasi. Fenomena ini dikenal dengan nama deflagrasi ke detonasi (*deflagration – to – detonation transition* (DDT)).

5.3.3.3 Detonasi gas

Proses detonasi terjadi dari deflagrasi gelombang kejut yang terintegrasi pada proses pembakaran. Penjalaran detonasi pada kecepatan di atas kecepatan suara pada media yang tak-terbakar, biasanya dengan kecepatan 1 500 m/detik hingga 2 000 m/detik, dan menghasilkan tekanan tinggi. Energi yang digunakan pada proses detonasi lebih tinggi dari pada proses deflagrasi. Detonasi terjadi pada campuran hidrogen-oksidator yang lebih tinggi, serta sumber penyalaan yang juga lebih tinggi daripada proses deflagrasi. Sebagai contoh, di tempat terbuka, diperlukan penyalaan yang tinggi untuk menghasilkan detonasi pada campuran bahan bakar hidrogen – udara. Detonasi menghasilkan tekanan yang lebih besar 2-3 kali dari tekanan kejut.

5.3.3.4 Detonasi pada fase cair atau kondensasi

Oksidator padat yang dicampur dengan hidrogen cair dapat digunakan sebagai detonator yang menghasilkan ledakan seperti bahan peledak, dengan energi ignitor yang cukup besar.

5.3.3.5 Pertimbangan keselamatan

Pertimbangan keselamatan proses deflagrasi gas hidrogen dan detonasi antara lain mencakup:

- Kegagalan sistem yang dapat menyebabkan terjadinya campuran hidrogen-oksidator;
- Pengaruh penutupan terhadap sistem baik dari dalam maupun dari luar, dan
- Konsekuensi dari terjadinya tekanan tinggi, temperatur tinggi, dan propagasi nyala api yang cepat.

Kondisi yang diperlukan untuk detonasi fase cair umumnya tidak ditemukan pada standar peralatan. Proses deflagrasi campuran gas hidrogen-udara dapat menghasilkan tekanan sebesar 8 kali dari tekanan awal. Sementara detonasi yang terjadi dapat menghasilkan tekanan sebesar 16 kali dari tekanan awal, dan apabila terjadi pantulan gelombang antar dua permukaan, tekanan yang terjadi dapat meningkat hingga 50 kali dari tekanan awal. Pertimbangan lain yang cukup penting adalah sistem pengurang tekanan hidrogen yang dapat mencegah sistem hidrogen dari tekanan berlebih, mendeteksi terjadinya peningkatan tekanan. Namun, karena detonasi berlangsung dengan kecepatan yang lebih besar dari kecepatan suara, sistem pengurang tekanan yang biasa digunakan tidak dapat mendeteksi kenaikan tekanan yang terjadi secara cepat.

5.4 Faktor-faktor yang terkait dengan bahaya tekanan

5.4.1 Umum

Hidrogen banyak digunakan dalam bentuk gas bertekanan tinggi atau dalam bentuk cairan kriogenik. Pada kedua kondisi tersebut, beberapa bahaya yang berkaitan dengan tekanan, khususnya tekanan berlebih, harus diperhatikan pada saat perancangan dan pengoperasian sistem atau komponen hidrogen.

5.4.2 Gas hidrogen

Hidrogen dalam fase gas dapat dikompresi ke tekanan yang sangat tinggi. Pada keadaan ini, hidrogen memiliki potensi energi yang besar. Pelepasan energi hidrogen dapat menghasilkan gelombang ledak (*blast wave*) yang besarnya tergantung dari laju pelepasan energinya.

5.4.3 Hidrogen cair

Perubahan fase hidrogen dari cair menjadi gas menyebabkan terjadinya peningkatan volume secara tiba-tiba. Perubahan volume pada fase gas terjadi secara gradual ketika temperatur berubah dari temperatur fase cair menjadi temperatur lingkungan.

5.4.4 Pertimbangan Keselamatan

Pada kondisi hidrogen cair, perubahan fase dari cair menjadi gas menyebabkan terjadinya kenaikan volume dan tekanan berlebih dalam waktu yang sangat singkat pada ruang tertutup, yang pada bejana tekan atau perpipaan hal ini dapat menyebabkan ledakan. Jenis bahaya ini dapat dikurangi dengan menggunakan katup pengaman pengurang tekanan (*relief devices*) dimana setiap komponen pada sistem hidrogen cair atau gas hidrogen bertemperatur rendah dapat terperangkap; seperti pada celah antara dua buah katup. Jika peralatan pengaman tidak berfungsi dengan baik akan mengakibatkan kerusakan berat pada peralatan dan menghasilkan terjadinya gelombang ledak dan atau lontaran serpihan material berkecepatan tinggi. Jarak aman bagi personil dan fasilitas lain dari lokasi bejana gas bertekanan tinggi harus sangat diperhatikan dari bahaya ini.

5.5 Faktor-faktor terkait bahaya temperatur

Material yang didinginkan ke temperatur hidrogen cair, menyebabkan penurunan dimensi, penurunan sifat getas yang tajam, dan penurunan kalor spesifik.

Material yang digunakan harus memiliki ketangguhan yang cukup (*toughness*), dan perencanaan sistem dilakukan sesuai dengan penurunan dimensi material yang mungkin terjadi. Kegagalan material dapat menyebabkan kebocoran hidrogen, baik secara internal maupun eksternal sistem.

5.6 Faktor-faktor yang terkait dengan bahaya penggetasan oleh Hidrogen

5.6.1 Penggetasan hidrogen

Paparan hidrogen dapat menurunkan kekuatan struktur material pada bejana tekan atau komponen lainnya. Fenomena ini dikenal dengan penggetasan hidrogen (*hydrogen embrittlement*) dan terjadi sebagai akibat dari peresapan hidrogen ke celah pada struktur material. Pada tingkatan atomik, penggetasan terjadi melalui terurainya molekul hidrogen menjadi atom dan berdifusi ke dalam struktur logam. Pada temperatur sekitar sejumlah material logam berpotensi terhadap penggetasan hidrogen, terutama pada material dengan struktur kristal *body-centred cubic* (BCC). Hal ini banyak terjadi pada baja feritik yang terkena beban mekanik. Kegagalan pada penanggulangan penggetasan hidrogen akan

menyebabkan kegagalan struktur katastropik yang dapat ditanggulangi dengan material yang sesuai. (Lihat Lampiran C).

5.6.2 *Hydrogen attack*

Hydrogen attack merupakan kerusakan yang terjadi pada material baja paduan rendah pada temperatur di atas 200°C akibat dari penggetasan hidrogen. Kerusakan yang terjadi berupa degradasi pada struktur mikro baja yang disebabkan reaksi kimia antara hidrogen yang berdifusi dengan partikel karbida pada baja membentuk metana. Kerusakan akan semakin parah dengan semakin tingginya tekanan dan temperatur.

5.7 Bahaya terhadap kesehatan

5.7.1 Terbakar dingin

Kontak langsung kulit tubuh dengan hidrogen cair atau gas dingin hidrogen dapat menyebabkan mati-rasa, perubahan warna kulit menjadi keputih-putihan, dan nyeri akibat rasa dingin. Paparan hidrogen yang lama pada tubuh dapat menyebabkan hipotermia. Pekerja sebaiknya tidak menyentuh komponen logam dan harus menggunakan alat pelindung diri (APD).

5.7.2 Terbakar pada temperatur tinggi

Kontak secara langsung maupun tidak langsung dengan hidrogen dan produk gas panas hasil pembakaran dapat menyebabkan luka bakar parah. Temperatur nyala campuran hidrogen udara dalam kondisi stoikiometrik adalah 2 323 K. Hal ini disebabkan oleh senyawa karakteristik fisik pembakaran hidrogen di udara. Nyala hidrogen di udara sangat sulit dilihat pada siang hari, hal ini karena nyala hidrogen memiliki emisivitas rendah dan pembakarannya yang menghasilkan radiasi infra merah membuat operator tidak merasakan panas yang terjadi, meskipun berada di dekat nyala.

5.7.3 Terbakar akibat paparan UV

Pembakaran hidrogen menghasilkan radiasi UV, yang dapat menimbulkan akibat seperti terbakar sinar matahari. Operator yang bekerja di dekat sumber pembakaran hidrogen harus menggunakan APD dan perlengkapan khusus untuk melindungi wajah, mata, dan kulit.

5.7.4 Sesak nafas

Hidrogen tidak beracun, tetapi reaksi hidrogen dengan gas lain (kecuali oksigen) dapat menimbulkan risiko sesak nafas (*Asphyxiation*) asfiksasi pada ruang tertutup karena mengakibatkan jumlah oksigen menjadi berkurang.

5.8 Pendekatan secara kelompok dan pelatihan yang diperlukan untuk penggunaan hidrogen yang aman

Penyebab utama kecelakaan yang terjadi pada sistem hidrogen adalah kesalahan manusia (*human error*) (lihat 7.1.2). Besarnya tingkat kecelakaan yang mungkin dapat terjadi tidak selalu disebabkan oleh operator yang berada di dekat sistem, tetapi juga dapat bergantung bagaimana organisasi mengelola risiko kecelakaan hidrogen.

Keterbatasan perancangan sistem hidrogen, persyaratan operasi dan perawatan, dan potensi bahaya paparan terhadap personil dan masyarakat harus dipahami oleh seluruh pihak yang terlibat.

Penanganan sistem hidrogen dan hidrogen yang aman merupakan upaya kelompok yang memerlukan komunikasi yang efektif, pelatihan, dan manajemen organisasi. Setiap individu juga harus mendapatkan pelatihan yang konsisten sesuai dengan tanggung jawab dan keterlibatannya. Penanganan hidrogen dalam kapasitas yang besar, harus dilakukan melalui koordinasi dengan lingkungan sekitar, termasuk dengan pemadam kebakaran dan badan penanggulangan bencana lokal.

6 Sifat dasar hidrogen

6.1 Sifat umum

6.1.1 Sifat atom dan molekul

Nama hidrogen berasal dari bahasa Latin, yaitu: *hydro* (air) dan *genes* (membentuk), merupakan elemen yang paling sederhana dan banyak ditemukan di semesta. Atom hidrogen dapat memproses tiga kemungkinan ikatan dan isotop: protium, deuterium, tritium. Protium, dengan massa atom 1, merupakan isotop yang paling umum. Sebagai zat murni, hidrogen terdapat sebagai molekul, disimbolkan sebagai H_2 , dimana dua atom hidrogen tersebut membentuk ikatan kovalen. Pada hidrogen, terdapat dua bentuk molekul; *orthohydrogen* dan *parahydrogen*. Hidrogen dalam jumlah besar, baik dalam bentuk cair atau gas, merupakan campuran dari *orthohydrogen* dan *parahydrogen*, yang masing-masing besar kesetimbangan ditentukan oleh temperaturnya. Pada kondisi temperatur dan tekanan standar (STP), *parahydrogen* memiliki komposisi 25% dari total campuran. Campuran dengan komposisi ini disebut sebagai hidrogen normal. Jumlah *parahydrogen* akan semakin banyak pada temperatur yang lebih rendah; hidrogen cair pada temperatur 20 K terdiri dari 99,8% *parahydrogen*.

CATATAN Pada konsentrasi tinggi masa atom deuterium dan tritium yang lebih besar akan menghasilkan sifat fisik yang berbeda sehingga sifat radioaktifnya harus dipertimbangkan untuk keselamatan.

6.1.2 Penampakan dan karakteristik umum

Hidrogen pada fase gas bersifat mudah menyala, tidak beracun, dan tidak korosif. Gas hidrogen tidak berwarna, tidak berbau, tidak memiliki rasa, dan menyebabkan gangguan pernafasan (sesak nafas). Hidrogen pada fase cair tampak transparan dengan sedikit kebiruan dan tidak korosif.

6.1.3 Sifat fase

Perilaku perubahan fase hidrogen gas, cair, dan padat terjadi pada temperatur rendah. Pada temperatur tertinggi, sekitar 33 K, uap hidrogen berkondensasi menjadi cair. Titik didih normal (NBP) hidrogen 20,3 K pada tekanan absolut 101,323 kPa. Titik tripel (*triple point*), yaitu kondisi dimana ketiga fase tersebut berada, yaitu pada temperatur 13,8 K dan tekanan absolut 7,2 kPa (tekanan sub-atmosferik). Temperatur ini sangat jauh dari titik beku air, bahkan dari titik beku udara.

6.2 Sifat termofisik

Untuk keperluan penanganan keselamatannya, data teknis sifat hidrogen baik dalam fase cair maupun gas seperti terlihat pada Lampiran A.

6.2.1 Umum

[Dihapus, sebagian dipindahkan ke sub pasal 6.2]

6.2.2 Sifat termofisik gas hidrogen

6.2.2.1 Dispersi

Hidrogen memiliki gaya apung (*buoyancy*) yang tinggi dan difusifitas yang lebih besar dari gas lain. Pada keadaan sekitar, hidrogen memiliki densitas 0,083 8 kg/m³ dan berat jenis 0,069 6 (udara = 1). Hidrogen memiliki densitas 14 kali lebih ringan dari pada udara, sebagai gas paling ringan. Molekul hidrogen yang kecil, menghasilkan difusifitas yang lebih besar dari pada helium dan tiga kali lebih besar dari pada nitrogen di udara pada kondisi sekitar. Gas hidrogen juga mudah terdifusi ke dalam zat padat.

Jika terjadi kebocoran hidrogen, tingginya gaya apung berpengaruh pada lebih tingginya gerakan gas daripada tingginya difusifitas. Bagaimanapun, pengaruh angin dapat mendominasi difusi dan gaya apung. Gaya apung yang terjadi akan menghasilkan aliran konveksi. Konsekuensinya, gas hidrogen akan cepat menguap dan ketika bercampur dengan udara akan mudah menyala. Di udara bebas, campuran hidrogen dan udara akan cepat mengencer hingga lebih rendah di bawah batas flammability. Harus diperhatikan kondisi ini, jika uap hidrogen terlepas pada temperatur kriogenik. Uap hidrogen pada temperatur 23 K atau lebih rendah memiliki densitas lebih tinggi dibandingkan densitas udara pada kondisi (NTP) dan hidrogen dapat terletak di area bagian bawah, hingga temperaturnya naik.

6.2.2.2 Viskositas

Rendahnya viskositas hidrogen, ditambah dengan dimensinya yang kecil, dapat menjadi penyebab kebocoran gas hidrogen pada material berpori, sambungan, atau *seal*.

6.2.2.3 Kapasitas panas, konduktivitas termal, dan koefisien Joule-Thomson gas hidrogen

Pada perhitungan berbasis mol, kapasitas kalor hidrogen mirip dengan gas diatomik lainnya, dengan massa molekul yang lebih kecil. Konduktivitas termal hidrogen jauh lebih besar dibandingkan gas lain. Tidak seperti karakteristik gas lain, yang temperaturnya turun ketika diekspansi melewati *orifis* pada temperatur sekitar, ekspansi gas hidrogen menghasilkan panas. Umumnya ekspansi jenis ini terjadi pada sistem yang melepaskan hidrogen ke udara pada tekanan yang lebih tinggi melalui suatu celah. Peningkatan temperatur yang dicirikan oleh koefisien Joule-Thomson, tidak cukup untuk terjadinya penyalaan.

6.2.3 Sifat termofisik hidrogen cair

6.2.3.1 Massa jenis dan ekspansi termal

Parahydrogen cair pada titik didih normal (NBP) memiliki densitas 70,78 kg/m³, atau 14 kali lebih rendah daripada air, dan massa jenis 0,071 0 (H₂O = 1).

Ketika dipanaskan, volume hidrogen cair berekspansi secara signifikan, lebih besar daripada ekspansi air. Sifat-sifat ini diindikasikan oleh koefisien ekspansi termal, yang pada NBP 23

kali lebih besar dari air pada kondisi sekitar. Faktor keamanan menjadi lebih penting apabila bejana tekan yang digunakan untuk menyimpan hidrogen kriogenik tidak mampu menampung ekspansi dari fluida cair, yang akan menyebabkan terjadinya tekanan berlebih pada bejana tekan atau terjadi penyumbatan pada jalur aliran dan ventilasi.

6.2.3.2 Volume gas ekuivalen

Peningkatan volume gas yang diperkirakan terjadi, tergantung pada perubahan fase hidrogen dari cair menjadi gas, juga peningkatan volume sebagai akibat dari perubahan temperatur dari NBP ke NTP. Rasio antara volume akhir hidrogen cair menjadi gas dan ekspansi saat pemanasan adalah 845. Peningkatan volume ini dapat menghasilkan tekanan akhir sebesar 172 Mpa (25 000 psia), dengan volume awal 0,101 MPa (14,7 psia) apabila perubahan fase hidrogen menjadi gas berlangsung pada volume tetap.

6.2.3.3 Kapasitas panas

Kapasitas panas para-hidrogen cair pada tekanan konstan sebesar 9,688 kJ/kg.K, atau dua kali lebih besar dibandingkan dengan kapasitas kalor air, dan lima kali lebih besar dibandingkan kapasitas kalor oksigen cair pada NBP.

6.2.3.4 Konversi ortho-para

Proses pencairan hidrogen, tidak hanya membuang energi sensibel dan laten, juga harus membuang energi yang dilepaskan oleh konversi keadaan ortho-para. Panas yang dihasilkan saat konversi adalah 715,8 kJ/kg, 1,5 kali lebih besar daripada panas penguapan. Proses ini berlangsung secara eksotermal dengan sangat lambat, bahkan butuh beberapa hari untuk menyelesaikannya. Namun, proses ini dapat dipercepat dengan menggunakan katalis paramagnetik.

6.3 Sifat dasar pembakaran

6.3.1 Sifat pembakaran hidrogen

Campuran antara hidrogen-oksidator tidak hanya menghasilkan nyala api, tetapi juga dapat menyebabkan deflagrasi atau detonasi. Pada pembakaran hidrogen, terdapat dua variabel utama, yaitu rentang *flammability* dan energi penyalaan (*ignition*). Dua variabel ini digunakan untuk menunjukkan keadaan dimana kebakaran dan deflagrasi dapat terjadi. Rentang detonasi ditentukan dari pengukuran *cell* detonasi. Data pembakaran hidrogen dan perbandingannya dengan bahan bakar lain terdapat pada lampiran B.

6.3.2 Batas mampu-nyala untuk kebakaran dan deflagrasi

Hidrogen dalam jumlah besar, tidak bereaksi ketika terkena sumber nyala. Untuk terjadinya pembakaran, hidrogen harus tercampur dengan oksidator dalam jumlah cukup untuk membentuk campuran mampu nyala. Pada reaksi campuran stoikiometrik, terdapat rasio reaktan dalam jumlah tepat, dimana komponen bahan bakar dan oksidator dapat terbakar menghasilkan produk reaksi dan panas. Contohnya, dua molekul hidrogen bereaksi dengan satu molekul oksigen untuk menghasilkan dua molekul air. Dengan basis volumetrik, campuran ini terdiri dari sekitar 66,66% hidrogen dan 33,33% oksigen. Campuran bahan bakar-oksidator bukan-stoikiometrik, yaitu campuran kaya bahan bakar (jumlah bahan bakar lebih besar dari kebutuhan bahan bakar menurut stoikiometri) dan campuran miskin (jumlah bahan bakar lebih sedikit dari kebutuhan bahan bakar menurut stoikiometri) juga memungkinkan untuk terjadinya pembakaran, meskipun tidak seluruh reaktan habis

bereaksi. Terjadinya pembakaran juga ditentukan oleh rentang spesifik dari komposisi campuran, yang dipengaruhi oleh keadaan reaktan dan kondisi spesifik (temperatur dan tekanan).

Batas mampu-nyala merupakan cara mudah untuk menunjukkan rentang komposisi campuran bahan bakar/udara yang memungkinkan terjadinya pembakaran. Batas mampu nyala ini dinyatakan sebagai batas mampu nyala bawah (*Lower Flammability Limit*) / LFL untuk jumlah bahan bakar minimum yang memungkinkan terjadinya pembakaran, dan batas mampu-nyala atas (*Upper Flammability Limit*) / UFL untuk jumlah bahan bakar maksimum yang memungkinkan terjadinya pembakaran. Batas mampu-nyala umumnya ditulis dalam fraksi volume (presentase). Batas ini ditunjukkan pada tabel B.3, berkisar antara 4% hingga 75% fraksi volume. Rentang ini sangat besar jika dibandingkan dengan batas mampu nyala bahan bakar lain, misalnya bensin.

Data pembakaran khusus perlu disusun untuk kondisi hidrogen pada lingkungan bertekanan rendah, lingkungan yang mengandung bahan kimia, atau lingkungan yang berubah akibat kegagalan sistem hidrogen.

Berbagai faktor yang dapat mengubah batas mampu-nyala antara lain : temperatur, tekanan, pengencer, kekuatan sumber nyala, laju alir, jarak antara permukaan yang berdekatan dan arah propagasi. Hal ini digambarkan oleh pengaruh konveksi alami, yang memperbesar rentang mampu-nyala untuk perambatan nyala api pembakaran ke atas dan memperkecil rentang mampu-nyala untuk perambatan nyala api pembakaran ke bawah. Pada kasus ini, gaya apung menginduksi kecepatan nyala menuju gas panas.

Permukaan dingin dapat membuang energi dari api dan sumber nyala, sehingga jika permukaan itu cukup dekat maka pembakaran tidak akan berlangsung atau terinisiasi. Nyala hidrogen yang memasuki daerah tersebut mengalami proses *quenching*. Jarak *quenching* pada udara dengan kondisi sekitar (NTP) adalah 0,064 cm.

6.3.3 Energi penyalaan dan energi penyalaan minimum pada kebakaran dan deflagrasi

Berbagai proses, termasuk nyala api, percikan listrik, penyatuan kabel (*korsliting*), bom pembakar, permukaan panas, pemanas, kompresi adiabatik cepat, gelombang kejut dan material katalis, dapat menjadi sumber penyalaan pada campuran hidrogen/oksidator. Semua proses pemanasan sebagai bagian dari campuran yang mudah terbakar pada temperatur penyalaan otomatis (*auto-ignition temperature-AIT*), sehingga lapisan tak terbakar yang berdekatan juga bereaksi. Hasil dari proses ini adalah nyala api yang merambat ke seluruh campuran. Untuk campuran mudah terbakar dan jenis pengapian tertentu, terdapat suatu energi minimum dimana pengapian tidak terjadi. Hal ini dikenal sebagai energi pengapian minimum (*Minimum Ignition Energy – MIE*), dan parameter ini umumnya diukur menggunakan alat ukur penyalaan.

Besarnya MIE bervariasi sesuai dengan komposisi campuran. Sedikit energi diperlukan untuk menyalakan suatu campuran yang lebih dekat dengan komposisi stoikiometrinya. Selama rentang mudah terbakar dari campuran hidrogen/ udara, besarnya MIE bervariasi hampir tiga lipat dan bisa serendah 0,017 mJ. Namun, untuk tujuan praktis, besarnya MIE tetap konstan selama rentang konsentrasi hidrogen dari 25% hingga 35%. Selain komposisi campuran, faktor-faktor lain seperti tekanan gas awal dan temperatur dapat mempengaruhi MIE tersebut. Karena hampir semua sumber pengapian menghasilkan lebih dari 10 mJ, maka semua bahan bakar yang tercantum dalam Tabel B.2 akan terbakar jika rasio bahan bakar/ udaranya melebihi batas mudah terbakar rendah. Sumber pengapian yang kuat, mampu menghasilkan gelombang kejut, seperti percikan energi tinggi dan bahan peledak, yang dapat langsung menghasilkan detonasi.

6.3.4 Deflagrasi

Suatu nyala api yang dihasilkan dari mekanisme transfer panas dan transfer massa untuk membakar dan pindah ke campuran yang tidak terbakar dikenal sebagai deflagrasi. Dalam campuran stasioner di tempat terbuka yang tidak tertutup, api akan merambat dengan laminar atau "aliran halus" pada kecepatan 2,7 m/detik. Ruang tertutup, seperti ruang diantara dinding, dalam pipa dan saluran, meluasnya reaksi produk dan menghasilkan aliran yang besar, yang mendorong bagian depan nyala api lebih cepat ke dalam campuran yang tidak terbakar. Dengan reaksi aliran besar, permukaan yang berdekatan dengan nyala api dan adanya hambatan dapat meningkatkan pencampuran campuran yang tidak terbakar dan nyala api, sehingga meningkatkan laju pembakaran. Proses ini dapat mempercepat laju nyala api hingga ratusan meter per detik dengan disertai pembentukan tekanan berlebih yang besar, mencapai beberapa ratus kilopascal. Pada kecepatan tinggi, turbulensi yang diciptakan oleh hambatan aliran dapat menyebabkan pembentukan gelombang kejut yang dapat mengawali terjadinya ledakan. Proses ini dikenal sebagai transisi deflagration ke detonasi (DDT). Kecepatan propagasi maksimum nyala api pembakaran deflagrasi dalam bidang aliran turbulen mendekati kecepatan suara dalam campuran gas tidak terbakar (975 m/detik untuk campuran hidrogen/udara stoikiometrik).

6.3.5 Detonasi

6.3.5.1 Umum

Detonasi adalah dicirikan oleh penyalaan otomatis dari suatu gas yang dikompresi secara tiba-tiba. Detonasi merambat pada kecepatan supersonik dari 1 500 m/detik hingga 2 000 m/detik. Kecepatan ini tergantung dari kondisi campuran tak terbakar dengan kenaikan tekanan 1,15 MPa hingga 2 MPa. Proses detonasi tidak hanya terdiri dari gelombang kejut tunggal, namun juga terdiri dari sel-sel detonasi berukuran kecil.

6.3.5.2 Rentang detonasi

Besarnya sel-sel detonasi tergantung pada konsentrasi campuran dan tingkat ketertutupan. Dimensi ini dapat dikaitkan dengan energi kritis yang diperlukan untuk memulai terjadinya suatu detonasi dan ke dimensi kritis dimana detonasi tidak dapat terjadi. Data detonasi hidrogen/ udara ditunjukkan dalam Lampiran B. Data besarnya sel detonasi bervariasi tidak hanya dengan konsentrasi campuran, tetapi juga dengan berbagai faktor lain termasuk tekanan, keberadaan bahan pengencer, dan temperatur. Dengan mengetahui konsentrasi campuran dan besarnya sel, pendekatan umum untuk mengevaluasi batas detonasi adalah menentukan apa sumber yang mungkin dapat dipercaya sebagai energi kritis untuk memulai detonasi. Sistem tertutup dievaluasi untuk mengetahui berapa dimensi yang cukup memungkinkan terjadinya detonasi. Dalam campuran tidak terbatas, tidak mungkin langsung mulai terjadi detonasi, karena energi minimum pengapian langsung sekitar 1 kJ, yang setara dengan bahan peledak padat.

Dibandingkan kebakaran dan deflagrasi, proses terjadinya detonasi memerlukan campuran yang mendekati nilai stoikiometrik dan energi penyalaan yang lebih besar. Data sel detonasi diperlukan untuk melakukan kuantifikasi batas detonasi, dari pada batas komposisi campuran karena peningkatan energi awal untuk memulai terjadinya detonasi pada batas yang besar.

7 Mitigasi dan pengendalian resiko

7.1 Mitigasi dan pengendalian resiko

7.1.1 Umum

Beberapa prinsip umum, panduan dan pelatihan perlu diperhatikan untuk penggunaan hidrogen secara aman.

Penggunaan prinsip-prinsip tersebut tergantung dari kebutuhan. Pengembangan sistem hidrogen yang digunakan untuk keperluan publik harus dirancang dengan teliti dan memenuhi persyaratan minimum untuk mencegah kesalahan yang mungkin terjadi. Sistem hidrogen yang digunakan untuk keperluan industri harus memenuhi seluruh persyaratan yang ditetapkan.

7.1.2 Pelajaran dari pengalaman

Perancangan dan pengoperasian sistem hidrogen, harus mempertimbangkan tujuan mitigasi lain yang pernah dilakukan, yaitu:

- Meminimalisir kemungkinan terjadinya kesalahan manusia, dan
- Sistem yang aman jika terjadi kesalahan manusia.

7.1.3 Penanggulangan bahaya

Beberapa pilihan penanggulangan bahaya yang dapat dilakukan antara lain: eliminasi, pencegahan, menghindari, pengendalian, dan meninggalkan.

Pilihan yang umum digunakan untuk penanggulangan bahaya adalah dengan cara mengeliminasi bahaya tersebut, walaupun cara ini untuk sistem hidrogen tidak selalu memungkinkan untuk dilakukan. Sifat hidrogen yang juga sebagai bahan bakar, membuatnya menjadi sangat berbahaya.

Jika bahaya tidak dapat dieliminasi, kemungkinan dapat dicegah. Pencegahan dapat dilakukan antara lain dengan menggunakan material yang tidak terpengaruh oleh penggetasan hidrogen.

Pilihan lain yang sering dilakukan adalah dengan mengendalikan tekanan dan laju aliran hidrogen saat penggunaan.

7.1.4 Meminimalkan tingkat risiko bahaya

Prinsip utama penggunaan hidrogen secara aman adalah menentukan desain dan pengoperasiannya dengan meminimalkan keparahan konsekuensi dari potensi kecelakaan. Hal ini dapat dicapai melalui beberapa cara, yaitu:

- meminimalkan jumlah hidrogen yang disimpan dan digunakan dalam suatu sistem;
- mengisolasi hidrogen dari pengoksida, bahan berbahaya dan peralatan berbahaya;
- memisahkan orang dan fasilitas dari potensi dampak kebakaran, ledakan, atau pemicu ledakan yang berasal dari kegagalan peralatan atau sistem penyimpanan hidrogen;
- meninggikan letak sistem hidrogen atau membuat saluran ventilasinya di atas fasilitas lainnya;
- mencegah terakumulasinya campuran hidrogen-pengoksida pada ruang tertutup (di bawah atap, peralatan penyimpan, atau dalam peralatan yang tertutup);

- membatasi jumlah orang yang terpapar dengan meminimalkan jumlah orang yang terpapar, waktu seseorang terpapar, penggunaan alat pelindung diri (APD), penggunaan alarm atau perangkat peringatan (termasuk pendeteksi hidrogen atau kebakaran), dan pengendalian lingkungan di sekitar sistem hidrogen;
- melakukan pemeliharaan yang baik, seperti memelihara jalur akses evakuasi tetap bersih dan menjaga sistem hidrogen terhindar dari sampah atau kotoran lainnya.
- Memperhatikan persyaratan operasional yang aman, seperti bekerja berpasangan saat bekerja dalam keadaan yang berbahaya.

7.2 Mitigasi risiko perancangan

7.2.1 Merancang kesadaran terhadap keselamatan

Sistem atau fasilitas hidrogen harus memiliki aspek keselamatan yang dipersyaratkan yang meliputi desain gagal-aman, operasi keselamatan otomatis, peralatan keselamatan dan peralatan peringatan.

Desain gagal-aman meliputi perlengkapan aspek keselamatan berlebih (misalnya, peralatan pelepas tekanan), sistem cadangan dan komponen utama, posisi katup dan komponen yang sejenis pada sistem gagal-aman (misalnya, katup harus otomatis menuju ke posisi aman saat berada dalam keadaan mati listrik); toleransi yang perlukan terhadap kegagalan tunggal atau ganda, tergantung pada akibat risiko bahaya.

Desain keselamatan otomatis meliputi aspek-aspek seperti pemantauan jarak jauh terhadap informasi kritis, operasi jarak jauh, dan pembatasan secara otomatis keadaan yang sedang beroperasi (misalnya, tekanan atau laju aliran) atau pengoperasian otomatis dari peralatan yang tepat saat terdeteksi hidrogen. Termasuk dalam hal ini yaitu pengoperasian katup penutup, menyalakan atau mematikan ventilasi secara tepat, dan memulai proses penghentian yang tepat.

Suatu sistem hidrogen harus mencakup peralatan keselamatan dan peringatan yang sesuai dengan kebutuhan guna memberikan peringatan kepada petugas saat terjadi kondisi yang tidak normal, kerusakan, atau kegagalan operasi. Peralatan tersebut harus memberikan kesempatan yang cukup kepada petugas untuk bertindak.

7.2.2 Pemilihan bahan konstruksi yang tepat

7.2.2.1 Umum

Harus digunakan bahan yang sesuai untuk hidrogen dan keadaan yang memungkinkan terkena paparannya.

Bahan yang bersentuhan dengan bahan lain harus sesuai satu dengan yang lainnya. Bahan untuk sistem hidrogen meliputi bahan-bahan logam dan non-logam (seperti polimer dan komposit). Pemilihan bahan harus memperhatikan : pengaruh temperatur, pengaruh penggetasan hidrogen, permeabilitas dan prositas, dan kompatibilitas bahan logam yang berbeda saat digunakan secara bersamaan.

7.2.2.2 Pertimbangan desain untuk temperatur rendah

Sifat kekerasan pada temperatur rendah suatu bahan logam sangat ditentukan oleh struktur kisinya. Bahan logam dan logam campuran yang memiliki struktur berbentuk kubik berpusat-muka, seperti baja austenitik dan aluminium, campuran tembaga dan nikel, hanya menghasilkan sifat kekerasan yang akan berkurang sesuai dengan tingkat temperatur kriogenik. Bahan komposit yang diperkuat oleh bahan serat yang cukup (memiliki sifat toleransi yang bagus), dan struktur yang dilapisi kaca, poliamida, atau karbon dapat digunakan untuk memberikan sifat yang sangat baik pada kondisi kriogenik.

Desain peralatan yang digunakan dalam temperatur yang rendah harus mampu mengatasi stres yang disebabkan oleh pemuaian (ekspansi) dan kontraksi termal. Terdapat perbedaan yang cukup besar dalam total kontraksi linear antara berbagai bahan, yaitu bahan polimer memiliki kontraksi yang sangat besar daripada bahan logam. Desain yang tepat harus mengakomodasi pemuaian termal dari bahan-bahan yang berbeda yang digunakan.

Kondensasi dan pemadatan zat pencemar dalam sistem kriogenik atau pada permukaan eksternal dingin dari struktur penahan tidak sesuai dengan kriteria desain. Dalam suatu sistem, adanya zat pencemar harus diminimalkan. Permukaan eksternal dapat disekat menggunakan pelindung atau insulator. Hati-hati dalam penggunaan insulator terbuat dari foam atau bahan lain yang mudah terbakar, yang terpapar langsung udara cair yang terkondensasi. Pengkayaan oksigen dapat meningkatkan sifat mudah terbakar dan dapat menyebabkan pembentukan senyawa yang sensitif terhadap kejutan.

Jika menggunakan kondisi yang berpotensi adanya paparan yang tidak dapat melindungi manusia, harus digunakan insulator yang untuk melindungi dari terbakar kriogenik (terbakar dingin).

7.2.2.3 Penggetasan dan *hydrogen attack*

Kerentanan terhadap penggetasan hidrogen dapat dikurangi melalui tindakan sebagai berikut:

- mengendalikan tingkat kekerasan bahan, sehingga tingkat kekuatan bahan yang digunakan dapat berada pada nilai yang aman;
- menurunkan tingkat stres bahan;
- meminimalkan tegangan sisa, misalnya dengan penghilang-tegangan akibat proses pengelasan dan dengan menormalisasi atau mendinginkan bahan secara perlahan;
- menghindari atau meminimalkan deformasi plastik dingin dari operasi seperti pelengkungan atau pembentukan dingin;
- menghindarkan situasi yang dapat menyebabkan kelelahan lokal pada komponen yang bergantung pada siklus beban yang berkesinambungan, karena hidrogen dikenal mampu mempercepat inisiasi dan memicu kerusakan pada struktur;
- menggunakan baja tahan karat austenit, yang umumnya tidak begitu rentan terhadap penggetasan hidrogen dan biasanya digunakan sebagai bahan berstruktur untuk peralatan hidrogen karena sifat kekuatannya yang sangat baik pada temperatur kriogenik;
- menggunakan metode pengujian yang ditentukan dalam ISO 11114-4 untuk memilih bahan logam yang resisten terhadap penggetasan hidrogen.

Penyelesaian praktis teknis untuk menghindari *hydrogen attack* adalah penggunaan baja campuran rendah dengan stabilisator karbida untuk mengurangi reaktivitas karbon hidrogen yang terabsorpsi.

7.2.2.4 Bahan bukan logam

Bahan bukan logam (karet atau plastik atau polimer) dapat digunakan sebagai bahan seal pada peralatan dan sistem hidrogen. Hidrogen dapat berdifusi melalui bahan tersebut lebih mudah dibandingkan dengan bahan logam. Jumlah hidrogen tersebut biasanya tidak cukup untuk membuat campuran yang mudah terbakar di luar bejana, tetapi dapat menyebabkan pengurangan gas pada periode yang lama, atau dapat merusak insulasi vakum.

Pemilihan bahan organik yang digunakan sebagai penyekat untuk hidrogen bertekanan tinggi harus dilakukan secara tepat. Perembesan hidrogen ke dalam bahan organik dalam periode yang cukup lama disertai dengan resapan hidrogen pada bahan tersebut dalam waktu lama, yang diikuti dengan penurunan tekanan yang cepat dapat menyebabkan kegagalan mekanik atau sobekan pada bahan penyekat. Polimer dengan penguat serat (FRP) semakin menjadi penting sebagai bahan untuk bejana bertekanan. Pelapis logam biasanya ditempatkan di bagian dalam bejana untuk menahan hidrogen sehingga polimer yang diperkuat serat tidak berhubungan langsung dengan hidrogen.

7.2.3 Pertimbangan untuk bejana dan komponennya

Petunjuk berikut berlaku untuk sistem hidrogen gas maupun cair. Bejana penyimpanan hidrogen harus:

- dirancang, dipabrikan, dan diuji sesuai dengan standar dan aturan bejana tekan,
- dibuat dari bahan yang tepat,
- diinsulasi dengan insulasi temal yang tepat (khususnya tempat penyimpanan hidrogen cair),
- dilengkapi dengan katup penutup pada lubang pembuangan, sedekat mungkin dengan bejana,
- dilengkapi dengan sistem kontrol tekanan (terutama bejana penyimpanan hidrogen cair),
- dilengkapi dengan sistem ventilasi yang telah ditetapkan,
- dilengkapi dengan alat pelepas tekanan untuk mencegah tekanan berlebih,
- diletakkan sesuai dengan standard jarak-kuantitas yang sesuai,
- diberi tanda yang jelas "Hidrogen" atau "Hidrogen Cair – Gas Mudah Terbakar".

Tangki hidrogen cair yang dikosongkan dan kembali ke kondisi sekitar, harus diperiksa terhadap adanya akumulasi kotoran seperti oksigen dan nitrogen, sebagai bagian dari prosedur pemeliharaan rutin. Campuran yang mendekati stoikiometri dengan partikel oksigen dalam hidrogen cair memiliki risiko untuk meledak.

Akumulasi oksigen pada hidrogen yang disimpan tidak boleh melebihi 2% fraksi volume ketika campuran dihangatkan pada ruang tertutup menjadi berbentuk gas.

7.2.4 Pencegahan tekanan berlebih

Terdapat potensi pengembangan tekanan yang dapat melebihi kemampuan penahan pada sistem hidrogen, khususnya pada hidrogen cair, yang disebabkan oleh peningkatan volume akibat perubahan fase cair ke gas. Bahaya ini dapat diatasi dengan penggunaan alat pelepas tekanan.

7.2.5 Pertimbangan untuk perpipaian, sambungan, dan persambungan

Beberapa pertimbangan yang diperlukan untuk perpipaian hidrogen gas dan cair yaitu:

- perancangan, pabrikasi dan pengujian dilakukan sesuai standar yang ditentukan;
- dibangun dengan bahan yang tepat;
- memiliki fleksibilitas yang tepat (seperti sambungan ekspansi, lengkung dan *offset*);
- ditempatkan sesuai dengan standar yang ditentukan;
- tidak ditempatkan di bawah jaringan listrik;
- jika memungkinkan hindari penimbunan jalur pipa hidrogen. Jika harus ditimbun, pertimbangkan dampak korosi galvanik, keperluan untuk inspeksi secara visual, integritas lintasan, dan kemungkinan kebocoran mengarah ke lokasi yang tidak terduga yang dapat terakumulasi dan terjadinya resiko ledakan. Pengecekan kebocoran sulit dilakukan pada lintasan yang ditimbun, terkecuali dengan menggunakan teknik penurunan/pengurangan-tekanan (*pressure-decay*);
- korosi galvanik dapat terjadi, terutama dalam keadaan lembab, dengan material logam yang berbeda dan pada sambungan pemipaan jensi soket;
- gunakan penyangga, penunjuk dan jankar yang tepat;
- gunakan alat pelepas tekanan yang tepat;
- insulasi dengan insulasi temal yang tepat (khususnya untuk perpipaian hidrogen cair dan gas hidrogen dingin);
- pasang label untuk isi dan arah aliran.

Pengelasan adalah metode yang umum untuk penyambungan pipa; namun penggunaan flenk, ulir, soket, peamsangan slip atau kompresi dapat dilakukan sesuai dengan kondisi operasi. Gasket dan penyekat ulir sesuai digunakan pada aplikasi gas hidrogen. Beberapa jenis sambungan, gasket, dan penyekat tidak dapat digunakan pada temperatur rendah. Sambungan bayonet umumnya digunakan pada persambungan pipa hidrogen cair. Sambungan dengan las ringan (persambungan yang memiliki titik leleh rendah) tidak dapat digunakan untuk aplikasi hidrogen.

Bahan bukan logam dapat digunakan untuk penggunaan jangka pendek apabila cukup ventilasi dan tersedia pendeteksi hidrogen.

7.2.6 Syarat pembersihan

Suatu sistem hidrogen, termasuk komponennya, harus dirancang dan dipasang sedemikian rupa, yang memungkinkan sistem dapat dibersihkan, dan dipelihara secara efektif agar tetap bersih. Proses pembersihan yang efektif harus mampu menghilangkan lemak, minyak, dan bahan organik lainnya serta partikel kerak, karat, kotoran, percikan las dan aliran las. Kompatibilitas bahan pembersih dengan semua bahan konstruksinya harus ditetapkan sebelum digunakan. Umumnya metode pembersihan meliputi pembersihan dengan uap panas atau air panas, pembilasan kerak secara mekanik, pembersihan lemak dengan uap, pembersihan lemak dengan pelarut (mencuci), pembersihan lemak dengan deterjen (cuci basa), pembersihan asam (pickling) dan pembersihan secara berulang-ulang (purgings). Prosedur pembersihan harus ditetapkan dan ditinjau ulang untuk efektifitas dan keselamatan

7.2.7 Pertimbangan komponen

7.2.7.1 Umum

[Dihapus]

7.2.7.2 Alat pelepas tekanan

Alat pelepas tekanan harus dipasang pada tempat di mana cairan hidrogen atau gas hidrogen dingin dapat terjebak dalam volume berapapun, untuk mencegah kelebihan tekanan dari penyebaran hidrogen cair atau gas hidrogen dingin. Sistem bertekanan rendah yang disuplai dari sistem bertekanan tinggi dengan menggunakan regulator harus dilindungi dari keadaan tekanan berlebih dengan alat pelepas tekanan, kecuali sistem bertekanan rendah dirancang untuk tekanan maksimum dari sumbernya.

Alat pelepas tekanan harus disetel untuk membatasi tekanan sehingga tidak melebihi batas maksimum tekanan kerja suatu sistem yang dilindungi. Alat pelepas tekanan harus berukuran cukup untuk kapasitas aliran pada keadaan sangat ekstrim yang mungkin terjadi. Hidrogen yang dilepaskan dari saluran pembuangan oleh alat pelepas tekanan harus tidak mengenai komponen lainnya atau orang. Jika beberapa alat pelepas tekanan dipasang untuk dialirkan ke saluran ventilasi, yang juga harus dipastikan pengoperasian dari alat tersebut tidak membatasi aliran atau mempengaruhi alat pelepas tekanan lainnya. Jumlah dan jenis alat pelepas tekanan berlebih (seperti *relief valve* dan *rupture disk*) disesuaikan penggunaannya.

Katup penutup tidak boleh dipasang di antara alat pelepas tekanan dan volume yang dilindungi.

7.2.7.3 Katup

Katup jenis *Globe* atau *Kriogenik globe valve* dapat digunakan untuk hidrogen cair, selain *plug* atau *ball valve*. *Ball valve* yang digunakan pada hidrogen cair harus dapat mencegah terperangkapnya cairan pada bola ketika katup ditutup. Katup untuk aplikasi hidrogen cair umumnya dirancang dengan batang tuas yang panjang dan diinsulasi dengan jaket vakum.

7.2.7.4 Filter

Filter digunakan untuk mengurangi bahaya yang berhubungan dengan kontaminan, khususnya dari partikel padat dan dalam sistem hidrogen cair dari partikel padat yang dapat mengandung oksigen. Tujuan utama digunakannya filter adalah untuk menyaring kotoran di dalam sistem hidrogen. Rekomendasi yang terkait dengan penggunaan filter yaitu :

- Filter harus dapat diakses dan dapat diisolasi untuk pembersihan.
- Filter tidak dibersihkan dengan cara pembilasan balik melalui sistem.
- Filter harus dibersihkan atau diganti secara berkala atau kapanpun jika terjadi penurunan tekanan saat melewati filter dengan suatu nilai tertentu.
- Jumlah dan lokasi filter harus ditentukan sesuai keperluan untuk meminimalkan adanya kotoran dalam sistem (jalur isi ulang atau penyaluran hidrogen merupakan lokasi utama untuk filter).

7.2.7.5 Instrumentasi dan pengendalian

Instrumentasi merupakan suatu alat untuk berkomunikasi dalam suatu proses fisik untuk mendapatkan suatu pengukuran kuantitas dari suatu kondisi atau sifat proses. Pengendali diperlukan untuk memelihara atau merubah sifat atau kondisi dari suatu proses. Sistem

hidrogen harus memiliki peralatan instrumen dan pengendali yang cukup untuk menjamin pengoperasian sistem hidrogen dan keselamatannya pada suatu batasan yang ditetapkan.

7.3 Mitigasi dari risiko penyalan dan ledakan

7.3.1 Umum

Campuran hidrogen/udara dan hidrogen/oksigen dapat mudah terbakar pada rentang komposisi campuran, tekanan dan temperatur yang luas. Campuran yang mendekati stoikiometri pada tekanan sekitar sangat sensitif sehingga perancang, evaluator keselamatan, dan petugas lainnya harus dapat memperkirakan sumber penyalan yang mungkin terjadi dan tindakan tepat yang harus dilakukan untuk menghilangkan sumber penyalan tersebut.

7.3.2 Pencegahan terjadinya campuran hidrogen/pengoksida yang tidak diinginkan

Pencegahan terbentuknya campuran hidrogen/pengoksida yang tidak diinginkan merupakan kunci utama dalam mencegah kebakaran, deflagrasi atau ledakan. Usahakan hidrogen dan pengoksida seperti udara tetap terpisah. Beberapa metode untuk mencapai tujuan tersebut yaitu:

- **Pembersihan:** Sistem hidrogen harus dibersihkan menggunakan gas *inert* untuk menghilangkan udara sebelum memasukkan hidrogen ke dalam sistem, dan sistem harus dibersihkan dari adanya hidrogen sebelum membuka terekspose di udara.
- **Bebas dari kebocoran pada sistem:** Suatu sistem yang berisi hidrogen harus diuji dari kebocoran dan harus dinyatakan bebas bocor untuk dapat diisi hidrogen. Tes kebocoran secara berkala harus dilakukan dan jika ditemukan adanya kebocoran harus diperbaiki.
- **Pembuangan:** pembuangan hidrogen harus dilepaskan ke atmosfer melalui sistem ventilasi yang dirancang dan ditempatkan dengan benar.
- **Ventilasi:** Suatu ruang tertutup seperti ruangan atau bangunan yang dapat mengakumulasi hidrogen harus memiliki ventilasi yang cukup guna mencegah pembentukan campuran yang mudah terbakar.
- **Menjaga tekanan positif:** Sistem hidrogen, terutama sistem hidrogen cair, harus disimpan pada tekanan positif untuk mencegah udara dari luar masuk ke dalam sistem.
- **Pemanasan secara berkala sistem hidrogen cair:** Bejana penyimpan cairan hidrogen harus secara berkala dihangatkan untuk menjaga kemurnian hidrogen dari adanya uap udara dan pembersihan sistem.
- **Filter:** Suatu filter digunakan dalam sistem hidrogen cair untuk menangkap kotoran seperti udara padat. Filter harus diisolasi secara berkala, dihangatkan, dan dibersihkan untuk menghilangkan adanya kotoran

7.3.3 Penyalan

7.3.3.1 Sumber penyalan listrik

Salah satu parameter pencegah kebakaran, deflagrasi atau peledakan adalah menghilangkan sumber penyalan. Diperlukan energi yang sangat kecil untuk menyalakan campuran hidrogen/pengoksida. Sumber penyalan dapat dihasilkan dari listrik, panas dan mekanis.

Beberapa fenomena yang dianggap sebagai potensi penyalan dari sumber listrik yaitu:

- **Akumulasi muatan yang dapat menyebabkan pelepasan listrik statis:** Muatan arus statis yang disebabkan oleh akumulasi elektron di permukaan, yang besarnya ditentukan berdasarkan parameter konduktivitas elektrik dan kekuatan dielektrik suatu bahan. Laju relatif akumulasi muatan dan disipasi muatan pada cairan yang mengalir, menentukan jumlah akumulasi muatan. Efek ini sangat kecil terhadap hidrogen yang mengalir secara alami, baik hidrogen gas maupun cairan, tetapi partikel padat yang terdapat dalam aliran dapat sangat meningkatkan pembentukan muatan elektrik. Jenis gas atau partikel beku (oksigen, karbondioksida, nitrogen, hidrogen, pasir, logam, oksida yang terkelupas dari dinding pipa, dan lainnya) merupakan elemen yang penting. Pembentukan keelektrikan statis dapat menjadi masalah spesifik sistem hibrida logam, dimana partikel air yang kecil dapat menutup aliran hidrogen. Penggunaan filter non-logam untuk menjebak partikel dapat membahayakan dan menghasilkan 10 hingga 200 kali muatan lebih besar dari pada sistem tanpa filter. Luas permukaan filter yang besar menghasilkan muatan statis terakumulasi yang lebih banyak.
- **Pelepasan listrik statis:** Pelepasan listrik statis dapat menghasilkan temperatur yang tinggi, yang sering kali menyebabkan bahan mencapai temperatur penyalan. Sebagai contoh, gesekan suatu bahan terhadap bahan yang lain, seperti dengan kain baju atau dengan aliran dua fase, dapat menyebabkan akumulasi muatan elektrostatik.
- **Bunga api listrik:** bunga api listrik dapat menyediakan energi yang mampu memantik pembakaran campuran hidrogen/udara atau hidrogen/oksigen. Umumnya sumber bunga api listrik meliputi saklar, motor listrik, handphone, pager dan radio.
- **Sambaran petir:** sambaran petir dan potensi listrik yang dihasilkan di sekitar dan pada saat melalui sistem.
- **Muatan listrik yang dihasilkan oleh peralatan operasi:** Peralatan yang dapat menghasilkan muatan listrik antara lain kompresor, generator, kendaraan dan peralatan konstruksi lainnya.
- **Arus pendek listrik:** arus pendek atau kegagalan peralatan listrik dapat menghasilkan percikan dan bunga api.
- **Grounding:** metode grounding harus dievaluasi untuk meminimalkan risiko pelepasan arus statis dan potensi sambaran petir di luar bangunan. Bahan terpilih yang digunakan di lingkungan hidrogen harus dievaluasi kemampuannya untuk melepaskan listrik statis. Bahan insulator seperti kayu, kertas, dan beberapa kain biasanya akan membentuk lapisan konduktif yang dapat mencegah penumpukan statis dengan mengabsorpsi air dari udara sekitar dengan kelembaban relatif lebih besar dari 50%. Sistem grounding yang direkomendasikan untuk mencegah pelepasan listrik statis dapat mengacu pada standar yang ditentukan.

Peralatan listrik yang digunakan di lingkungan hidrogen juga dapat menjadi sumber percikan api atau pembangkit panas, perlindungan harus dilakukan mengikuti standar instalasi listrik yang ditentukan.

7.3.3.2 Sumber penyalan mekanis

Beberapa sumber penyalan mekanis antara lain :

- tumbukan mekanik dan/atau gesekan serta stres mekanik,
- patahan logam atau kerenggangan, dan
- getaran mekanis dan regangan yang berulang.

7.3.3.3 Sumber penyalan thermal

Beberapa sumber penyalan dari sumber panas, yaitu:

- pembakaran terbuka atau permukaan yang panas (misalnya, pengelasan dan puntung rokok);
- saluran pembuangan (*Exhaust*) (misalnya, mesin pembakaran dan cerobong pembuangan);
- peledakan (misalnya, peledakan pada konstruksi, bunga api atau petasan)
- katalis dan bahan kimia reaktif: Temperatur yang tinggi dapat dihasilkan dari interaksi hidrogen dengan katalis atau reaktan kimia lainnya;
- resonansi pengapian dari gelombang kejut berulang yang dapat terjadi pada sistem yang mengalir;
- pemanasan dengan kecepatan tinggi, yang mungkin terjadi dari cerobong gas buang;
- gelombang kejut dan/ atau fragmen, yang mungkin terjadi dari pecahnya tangki atau bejana tekan.

7.3.4 Deflagrasi dan detonasi

Potensi terjadinya deflagrasi dan detonasi harus diperhitungkan pada saat desain fasilitas dan pengoperasian sistem hidrogen. Strategi untuk meminimalkan potensi deflagrasi dan detonasi antara lain:

- hindari terakumulasinya campuran hidrogen yang mudah terbakar,
- gunakan penangkal api, lubang kecil, atau saluran untuk mencegah deflagrasi dan detonasi yang menyebar ke dalam sistem,
- penggunaan sistem pengencer dan semprotan air untuk menghambat percepatan api.

CATATAN Kobaran api hidrogen/udara sulit untuk dipadamkan dan dapat membakar di sekitar semprotan air yang besar. Jika potensi deflagrasi dan detonasi tidak bisa dihilangkan, maka desain sistem hidrogen dan pengoperasiannya harus mempertimbangkan kemungkinan yang dapat terjadi. Hal ini termasuk desain besaran kekuatan yang cukup untuk menahan tekanan tinggi atau pengoperasian yang dikendalikan dari jarak jauh untuk melindungi fasilitas dan personil.

7.3.5 Pengkayaan oksigen

Beberapa hal berikut menjadi pertimbangan yang harus diperhatikan saat mentransfer hidrogen dalam jumlah yang besar yaitu:

- Saat hidrogen cair ditransfer melalui saluran vakum yang diinsulasi, hidrogen dingin yang mengalir melalui tabung yang tidak cukup diinsulasi termal dapat dengan mudah mendinginkan sistem di bawah 90 K sehingga udara pekat dengan kandungan oksigen hingga 52% terbentuk.
- Kondensat yang kaya oksigen meningkatkan sifat mudah terbakar bahan dan membuat bahan yang normalnya tidak mudah terbakar menjadi memiliki sifat mudah terbakar. Ini yang harus diperhatikan saat mentransfer hidrogen.

7.4 Persyaratan pendeteksi

7.4.1 Pendeteksi gas hidrogen

Karena keterbatasan indera manusia, diperlukan sarana lain untuk mendeteksi hidrogen. Beberapa metode dan jenis pendeteksi keberadaan hidrogen ada secara komersial. Banyak pendeteksi yang cocok digunakan untuk sistem hidrogen dengan sistem peringatan dan pengoperasian yang otomatis.

Pendeteksi hidrogen dianjurkan dipasang di mana hidrogen digunakan. Beberapa lokasi yang disarankan adanya pemasangan detektor hidrogen yaitu:

- lokasi yang memungkinkan terjadinya kebocoran atau tumpahan hidrogen;
- pada persambungan hidrogen yang disambung-pisahkan secara rutin (misalnya, terminal pengisian bahan bakar hidrogen);
- lokasi yang memungkinkan hidrogen terakumulasi;
- pada saluran pengumpul udara bangunan, jika hidrogen di bawa ke dalam gedung;
- pada saluran pembuangan bangunan, jika hidrogen mungkin dilepaskan di dalam gedung.

Beberapa faktor utama yang harus dipertimbangkan dalam pemilihan sensor hidrogen yaitu:

- keakuratan,
- kehandalan,
- pemeliharaan,
- kalibrasi,
- batas pendeteksian (tinggi dan rendah),
- waktu respon,
- titik atau cakupan wilayah, dan
- kompatibilitas dengan sistem.

Operator sistem hidrogen harus memiliki pendeteksi hidrogen portabel yang siap digunakan di dalam dan sekitar sistem hidrogen. Tingkat konsentrasi hidrogen yang biasa digunakan untuk bunyi peringatan adalah 1% (fraksi volume) di udara, yang setara dengan 25% lebih rendah dari batas mudah terbakar. Tingkat konsentrasi ini secara normal cukup menyediakan waktu bagi personil untuk bereaksi dengan cara yang tepat, seperti penghentian sistem, evaluasi personel, atau tindakan lainnya yang diperlukan.

7.4.2 Pendeteksi api

Saat tidak ada kotoran, nyala api hidrogen/udara hampir tidak dapat terlihat secara kasat mata apalagi pada siang hari. *Emisivitas* (daya pancar) nyala api hidrogen yang rendah, sehingga nyala api hidrogen sulit dilihat atau dirasakan. Alat pendeteksi nyala api hidrogen harus disediakan di semua area yang memungkinkan terjadinya bocoran, cipratan, atau akumulasi hidrogen yang berbahaya.

Beberapa faktor utama yang harus dipertimbangkan dalam pemilihan pendeteksi nyala api hidrogen adalah:

- jarak dan wilayah yang dijangkau pendeteksi;

- kerentanan terhadap alarm palsu dari sumber lain seperti matahari, petir, pengelasan, sumber pencahayaan atau tumpukan nyala api;
- waktu respon;
- kepekaan terhadap spektrum radiasi yang tepat.

Operator sistem hidrogen harus memiliki pendeteksi nyala api hidrogen portabel yang siap digunakan di dalam dan sekitar sistem hidrogen. Tumpukan jerami yang tersebar di suatu daerah yang mudah terbakar dapat digunakan sebagai pendeteksi. Kewaspadaan harus dilakukan ketika hanya mengandalkan pendeteksi nyala api portable sebagai proteksi di sekitar fasilitas hidrogen secara luas. Pendeteksi dapat gagal mendeteksi bocoran hidrogen yang dapat terbakar dalam jumlah yang besar karena adanya aliran udara turbulen yang mengenai personel dan mengisolasi jalur yang aman.

7.5 Persyaratan fasilitas

7.5.1 Umum

Pengawasan fasilitas yang menggunakan hidrogen harus mempunyai persyaratan yang sama untuk desain dan keselamatan komponen dan sistem hidrogen.

7.5.2 Lokasi

Suatu fasilitas atau sistem hidrogen harus cukup jauh dari orang dan fasilitas lainnya untuk dapat meminimalkan efek akibat suatu peristiwa seperti kebakaran, deflagrasi atau detonasi. Jarak pemisah yang cukup akan menyediakan perlindungan pada fasilitas hidrogen dari insiden fasilitas lain yang berdekatan. Syarat jarak pemisah, juga sering disebut sebagai kebutuhan kuantitas-jarak (Q-D), yang ditentukan merupakan fungsi dari jumlah hidrogen yang dioperasikan. Umumnya, semakin besar jumlah hidrogen yang terlibat, maka semakin besar jarak pemisah yang dianjurkan. Dalam kondisi tertentu, hidrogen dalam jumlah kecil dapat disimpan dan digunakan di dalam ruangan atau gedung, tetapi secara umum sangat dianjurkan untuk menyimpan dan menggunakannya di luar ruangan.

Beberapa faktor utama yang menjadi pertimbangan dalam menentukan Q-D pada fasilitas hidrogen yaitu:

- jumlah hidrogen yang terlibat,
- kondisi hidrogen (gas, cair, tekanan, temperatur, dll),
- efek migrasi asap yang mudah terbakar karena pembakaran, dan
- adanya bahan bakar atau pengoksida lain, serta
- perlindungan yang diberikan oleh pembatas, penghalang atau cara lain dari jenis kegiatan yang dilakukan pada fasilitas hidrogen (misalnya pengujian propulsi).

7.5.3 Daerah terlarang

Area dengan ukuran yang memadai harus tersedia di sekeliling fasilitas hidrogen, khusus untuk tempat penyimpanan hidrogen harus dapat dikendalikan. Pengendalian meliputi :

- Pembatasan akses hanya untuk personel yang memiliki hak tugas, memenuhi persyaratan pelatihan, dan menggunakan alat pelindung diri yang tepat;
- Daftar peralatan yang telah disetujui (memenuhi persyaratan khusus, seperti eliminasi atau pengendalian sumber penyalan),

- Daftar pengoperasian yang disetujui (yang konsisten dengan persyaratan untuk keselamatan personil dan mengurangi risiko terhadap fasilitas yang berdekatan),
- Adanya tanda-tanda peringatan pada daerah tertentu yang sesuai, agar personil menyadari potensi bahaya di daerah tersebut,
- Dianjurkan menggunakan pagar yang tepat untuk mengendalikan akses ke daerah-daerah kritis dan berbahaya.

Harus ada prosedur pengendalian personil yang memasuki dan meninggalkan area, termasuk pembatasan keberadaan personil pada area terlarang pada waktu yang sama.

7.5.4 Tanggul, pembatas, dan penghalang

Tanggul atau pembatas dapat digunakan untuk menahan tumpahan hidrogen cair, membatasi penyebaran hidrogen pada area yang tidak diinginkan. Penggunaan batu pecah pada area pembatas dapat menambah area permukaan yang dapat meningkatkan laju penguapan. Pembatasan area dapat membatasi laju penguapan, sehingga menghasilkan awan yang mudah terbakar yang lebih kecil, tetapi memerlukan waktu yang lebih lama untuk menguapkan cairan yang tumpah.

Penghalang dapat digunakan untuk melindungi fasilitas hidrogen dari pecahan besi dan pecahan lainnya dari fasilitas terdekat lainnya atau melindungi fasilitas terdekat dari pecahan dan fragmen yang berasal dari ledakan fasilitas hidrogen. Tumpukan tanah dan semburan merupakan jenis penghalang yang umum. Penghalang dapat juga meliputi barier fisik untuk melindungi fasilitas atau sistem hidrogen dari kendaraan bermotor. Persyaratan besaran jarak fasilitas hidrogen dengan fasilitas lain dapat dikurangi melalui penggunaan penghalang untuk mengurangi pecahan atau fragmen yang berbahaya.

Penggunaan penghalang atau tanggul dan perangkat pertahanan lainnya di sekitar fasilitas atau sistem hidrogen harus memenuhi tingkat ketelitian yang tinggi, karena adanya peningkatan efek detonasi akibat adanya pembatasan.

7.5.5 Peralatan pengendali keselamatan

Suatu sistem atau fasilitas hidrogen harus dilengkapi dengan peralatan-peralatan pengendali-keselamatan, seperti:

- **Sistem peringatan:** Sistem peringatan harus dipasang untuk mendeteksi terjadinya suatu keadaan tidak normal, kegagalan fungsi, dan untuk mengindikasikan awal kegagalan. Sistem transmisi data peringatan dengan sinyal yang dapat dilihat dan didengar harus memiliki kelebihan guna mencegah kegagalan tunggal akibat kelumpuhan sistem.
- **Pengendali aliran:** Katup keselamatan dan pengatur aliran harus dipasang secara cukup untuk melindungi personil dan peralatan selama penyimpanan, penanganan, dan penggunaan hidrogen.
- **Aspek keselamatan:** Sistem dan peralatan keselamatan harus dipasang untuk pengendalian secara otomatis untuk mengurangi bahaya yang diduga akan terjadi pada sistem. Pengendali manual pada sistem guna mencegah rentang yang berlebih harus dibatasi dengan menggunakan alat pembatas otomatis.

Setiap perangkat baik perangkat lunak dan komputer yang digunakan sebagai pengendali keamanan harus:

- tidak bergantung pada peralatan yang sama untuk operasi normal, dan

- memiliki kelebihan yang tepat untuk mencegah kerusakan tunggal akibat ketidakmampuan peralatan.

Peralatan hidrogen harus dibersihkan menggunakan gas *inert* sebelum dan setelah hidrogen digunakan dalam peralatan tersebut. Udara dalam sistem harus dibersihkan menggunakan gas *inert* sebelum hidrogen digunakan pada sistem, dan hidrogen harus dibersihkan dari sistem menggunakan gas *inert* sebelum membuka sistem dan memasukkan udara. Ketelitian harus dilatih jika karbondioksida digunakan sebagai gas pembersih. Semua karbon dioksida akan sulit dihilangkan dari sistem pada titik rendah dimana gas dapat berakumulasi.

Beberapa teknik pembersihan yang umum:

- pengosongan dan penggantian gas-isinya (*backfill*),
- pemberian tekanan dan pengeluaran gas, dan
- pengaliran.

Pemilihan teknik pembersihan yang tepat harus disesuaikan dengan peralatan yang akan dibersihkan. Parameter utama pembersihan yaitu kecepatan aliran, waktu pembersihan, pencampuran dan pengenceran. Gas *inert* yang digunakan harus dilindungi secara tepat untuk menghindari terjadinya kontaminasi dengan gas hidrogen.

7.5.6 Pembuangan hidrogen

Hidrogen harus selalu dibuang sesuai dengan metode yang telah ditentukan. Hidrogen umumnya dibuang ke atmosfer melalui ventilasi (tempat hidrogen tidak dibakar) atau sistem pembakaran/*flare* (tempat pembakaran hidrogen yang dibuang). Titik pembuangan hidrogen melalui ventilasi harus berada di titik tertinggi dari lingkungan sekitar dan jauh dari jalur listrik atau potensi sumber nyala lainnya.

Pembakaran hidrogen lebih baik digunakan untuk pelepasan gas hidrogen dalam jumlah besar. Keadaan spesifik lokasi dan laju pembuangan hidrogen merupakan dua faktor yang harus dipertimbangkan dalam menentukan sistem yang tepat. Pembakaran hidrogen umumnya digunakan untuk laju pembuangan hidrogen lebih besar dari 0,23 kg/detik, atau untuk jumlah yang tidak aman dibuang melalui ventilasi.

Faktor pembuangan hidrogen yang harus diperhatikan yaitu:

- jumlah hidrogen yang masih terdapat di dalam awan yang mudah terbakar,
- luasnya awan yang mudah terbakar,
- radiasi termal dari nyala api (dari api sistem pembakaran hidrogen atau sistem ventilasi), dan
- keadaan tempat seperti luas area terlarang, lokasi bangunan, pengendalian personil, dan cuaca.

Aliran balik udara ke dalam sistem ventilasi harus dicegah. Tidak boleh menyemprotkan air, yang dapat memasuki sistem ventilasi hidrogen cair yang dapat menyebabkan air menjadi beku, karena dapat menyumbat sistem ventilasi.

Sistem ventilasi harus dilengkapi dengan sistem pemadam api sebaik pembersihan udara atau hidrogen dari sistem ventilasi. Hidrogen yang dikeluarkan dari sistem ventilasi sering menyala oleh petir atau aktifitas mekanik lainnya, yang dapat menghasilkan nyala api yang sulit dideteksi secara visual. Ukuran nyala api ditentukan oleh laju alir ventilasi hidrogen.

Radiasi termal dari sistem pembakaran harus dievaluasi dan dipisahkan pada jarak yang tepat untuk melindungi personil. Ventilasi di atas atap harus diletakkan, sehingga hidrogen tidak dapat masuk saluran masuk udara suatu bangunan.

7.5.7 Bangunan

Persyaratan rancangan bangunan dan ruangan, tempat dimana hidrogen disimpan dan digunakan, harus mempertimbangkan aspek keselamatan guna meminimalkan bahaya hidrogen, yaitu:

- konstruksi terbuat dari bahan yang tidak mudah terbakar;
- tidak memiliki ruangan yang dapat mengakibatkan terakumulasinya hidrogen;
- tidak memiliki sumber penyalaan;
- adanya pelepas tekanan untuk semua potensi ledakan akibat terjadinya tekanan berlebih;
- ventilasi yang cukup;
- penggunaan detektor hidrogen yang tepat.

7.5.8 Ventilasi

Persyaratan ventilasi harus mempertimbangkan kondisi berikut:

- Keberadaan hidrogen di dalam ruang tertutup, dan
- Perpindahan hidrogen ke dalam suatu ruang tertutup dari sumber di luar ruangan tertutup tersebut.

Sistem ventilasi harus dapat mengeluarkan hidrogen dari ruang tertutup. Sistem ventilasi tidak boleh memasukkan hidrogen ke dalam ruang tertutup, kecuali sistem dalam keadaan dimatikan.

Bocoran dan cipratan hidrogen ke dalam ruang tertutup dapat membentuk campuran gas yang dapat terbakar, sehingga ruangan tertutup yang berisi peralatan untuk penanganan dan penyimpanan hidrogen harus selalu mempunyai sistem ventilasi aktif dan pasif. Ruang tertutup harus mempunyai pendeteksi hidrogen untuk mendeteksi keberadaan hidrogen dan mencegah pembentukan campuran yang mudah terbakar.

Beberapa persyaratan sistem ventilasi untuk hidrogen yaitu:

- Ventilasi harus terpasang sebelum hidrogen dimasukkan ke dalam suatu ruangan tertutup dan berlanjut hingga hidrogen dikeluarkan dari ruangan tertutup tersebut.
- Ventilasi tidak boleh dimatikan sesuai prosedur penghentian dalam keadaan darurat kecuali sumber hidrogen berasal dari luar ruangan yang terkurung tersebut.
- Harus dihindari adanya langit-langit yang menggantung dan area-area kecil terbalik pada ruangan tertutup atau dipasang ventilasi yang memadai pada ruangan tersebut.
- Peralatan listrik pada sistem ventilasi harus memenuhi persyaratan untuk dioperasikan pada lingkungan yang mudah terbakar.

7.5.9 Komponen kelistrikan

Pertimbangan yang cermat harus dilakukan saat menggunakan peralatan atau kabel listrik yang dekat (sekitar 1 m) dengan lokasi adanya campuran hidrogen/udara yang dapat mengakibatkan nyala api pada keadaan berikut:

- pada saat keadaan operasi yang normal (misalnya pada terminal pengisian);
- karena perbaikan, operasi pemeliharaan atau kebocoran yang sering terjadi;
- karena pelepasan hidrogen akibat kerusakan atau kesalahan operasi peralatan, atau proses yang dapat menyebabkan kegagalan simultan dari peralatan listrik.

Pada keadaan ini, peralatan dan kabel listrik harus:

- telah disertifikasi untuk penggunaan pada lingkungan hidrogen,
- secara intrinsik aman digunakan pada lingkungan hidrogen, atau
- diletakkan pada penutup yang disertifikasi yang dibersihkan menggunakan gas *inert*.

Peralatan dan kabel listrik harus dapat beroperasi pada lingkungan permukaan yang terpapar pada temperatur campuran hidrogen/udara yang dapat menyebabkan nyala api. Peralatan yang tahan ledakan harus digunakan pada semua lokasi yang telah dideskripsikan kecuali jika terbukti peralatan tersebut tidak diperlukan, atau disyaratkan oleh peraturan perundangan terkait.

Peralatan dan kabel listrik harus berada sekitar 1 m - 8 m dari lokasi yang ditentukan di atas, atau pada jarak 5 m dari bejana penyimpanan gas hidrogen atau 8 m dari bejana penyimpanan hidrogen cair. Peralatan listrik yang berada pada jarak yang lebih besar dari 1 m seperti yang dideskripsikan di atas tidak boleh menghasilkan cipratan, percikan atau mekanisme penyalan api lainnya.

Penangkal petir harus terpasang pada peralatan hidrogen. Peralatan hidrogen harus terikat secara elektrik, khususnya pada persambungan yang menggunakan penyegel polimer dan digrounding. Peralatan hidrogen yang aktif dapat dipindahkan harus digrounding secara elektrik sebelum disambungkan kepada peralatan hidrogen lainnya. Harus dihindari terjadinya muatan listrik statik dan percikan api.

7.5.10 Peralatan alarm dan peringatan dini

Sistem peringatan harus dipasang untuk memberikan suatu peringatan jika terjadi situasi yang berpotensi terjadinya bahaya, sehingga dalam waktu yang tepat memungkinkan penghentian sistem hidrogen dengan aman.

Sistem peringatan harus menyediakan peringatan yang dapat didengar dan dilihat, atau keduanya.

Beberapa sistem atau kondisi peringatan yaitu:

- tekanan (tinggi atau rendah yang sesuai),
- adanya hidrogen pada intake ventilasi bangunan,
- keluarnya nyala api,
- terlepasnya isolasi *vacuum*,
- posisi katup (terbuka atau tertutup yang sesuai)
- kecepatan pompa (tinggi atau rendah yang sesuai)

- filter perbedaan tekanan,
- adanya kebocoran hidrogen, dan
- adanya api.

7.5.11 Perlindungan dan pemadaman kebakaran

Suatu subsistem perlindungan kebakaran harus dipertimbangkan untuk fasilitas dan sistem hidrogen. Tindakan perlindungan kebakaran meliputi:

- sistem penghentian proses (baik otomatis maupun manual),
- sistem penyemprot air,
- sistem pembanjiran, dan
- sistem pemadam dengan kimia-kering atau halon

Kebakaran kecil dapat dipadamkan menggunakan pemadam kimia-kering, pemadam karbondioksida, nitrogen atau dengan uap.

Umumnya kebakaran hidrogen tidak akan berhenti hingga sumber kebocoran hidrogen dapat diisolasi/dihentikan, karena adanya potensi bahaya terbakarnya awan hidrogen yang terbentuk dari hidrogen yang tidak terbakar.

Untuk mendinginkan peralatan yang berdekatan dengan api hidrogen dapat digunakan air.

7.6 Persyaratan pengoperasian

7.6.1 Umum

Fasilitas atau sistem hidrogen melibatkan sejumlah pengoperasian fasilitas untuk dapat berfungsi dengan normal. Operasi ini disamping menggunakan peralatan dan komponen sistem, juga personil yang melakukan operasi, peralatan khusus yang diperlukan untuk pengoperasian, dan alat perlindungan diri personil yang diperlukan untuk melindungi personil yang melakukan operasi. Selain operasi yang normal pada fasilitas atau sistem hidrogen, harus diperhatikan juga pengoperasian pada kondisi gawat darurat pada saat terjadi kegagalan atau kecelakaan operasi.

7.6.2 Alat perlindungan diri

Personil yang mengoperasikan fasilitas atau sistem hidrogen dapat mengurangi kemungkinan terjadinya bahaya dengan menggunakan alat perlindungan diri (APD) yang tepat. Beberapa kondisi yang mengharuskan personil terlindungi yaitu: terpapar temperatur kriogenik, temperatur nyala api, radiasi panas dari nyala api hidrogen, dan atmosfer hidrogen yang rendah oksigen atau pengurangan oksigen oleh gas inert seperti nitrogen dan helium.

APD yang diperlukan untuk pengoperasian yang menggunakan hidrogen harus menggunakan prosedur yang ditentukan.

Beberapa rekomendasi terkait dengan APD yang harus dipertimbangkan sebagai sesuatu yang penting saat bekerja dengan hidrogen yaitu:

- Pelindung mata harus dipakai (misalnya, pelindung wajah keseluruhan harus digunakan ketika menghubungkan atau memutuskan jalur atau komponen).

- Sarung tangan yang terinsulasi dengan baik harus dipakai dengan tepat ketika berhubungan dengan apa pun yang memungkinkan kontak dengan hidrogen cair atau gas hidrogen dingin. Sarung tangan harus terpasang dengan tepat, mudah dilepaskan, dan tidak memiliki manset berlengan lebar.
- Celana panjang penuh, lebih baik jika tanpa manset, harus digunakan dengan bagian kaki tetap berada di luar sepatu kerja atau sepatu bot.
- Sepatu hingga menutup jari-jari kaki harus digunakan (sepatu terbuka atau berpori tidak boleh digunakan).
- Pakaian yang terbuat dari katun asli, kain tahan api atau Nomex[®] harus digunakan. Jangan menggunakan pakaian yang terbuat dari nilon atau sintetis lainnya, kain sutera atau wol karena bahan ini dapat menghasilkan muatan listrik statis yang dapat menyalakan campuran yang mudah terbakar. Bahan Nomex[®] memiliki kualitas anti-statis yang baik dan tahan api. Bahan sintetis (pakaian) dapat meleleh dan melekat pada tubuh, yang menyebabkan bahaya kebakaran yang cukup besar. Pakaian apa pun yang terciprat atau tersemprot oleh hidrogen harus dilepaskan hingga pakaian tersebut bebas dari gas hidrogen secara keseluruhan.
- Sarung tangan yang sebagian terbuat dari kulit, dan sebagian lagi terbuat dari besi (gauntlet), pakaian yang ketat, atau pakaian yang dapat menyimpan atau menjebak cairan dalam tubuh tidak boleh digunakan.
- Pelindung pendengaran harus digunakan jika fasilitas atau sistem hidrogen menggunakan peralatan yang dapat menyebabkan suara bising.
- Topi pelindung kepala harus digunakan jika fasilitas atau sistem hidrogen memungkinkan terjadinya benda jatuh.
- Peralatan pernapasan untuk diri sendiri harus dipakai ketika bekerja pada ruangan tertutup yang memiliki atmosfer rendah oksigen.
- Pendeteksi hidrogen atau api *portable* harus digunakan untuk mengetahui adanya kebocoran hidrogen dan bahaya kebakaran.
- Personil harus menetralkan tubuhnya dari listrik statis sebelum menyentuh atau menggunakan peralatan pada sistem hidrogen.

Direkomendasikan untuk menggunakan peralatan yang tidak menimbulkan nyala api. Semua peralatan harus memiliki sistem peringatan untuk mencegah terjatuh, terbentur dengan suatu alat yang memicu tindakan gesekan, atau, yang dapat menyebabkan terjadinya percikan api.

7.6.3 Pendinginan

Proses pendinginan sistem hidrogen cair dari NTP ke suhu temperaturnya (NBP) harus dilakukan sesuai dengan prosedur yang telah disepakati dan terkendali. Beberapa teknik proses pendinginan antara lain melalui pengaliran cairan, aliran gas dingin, perendaman dengan cairan, dan pendinginan awal menggunakan nitrogen cair.

7.6.4 Transportasi

Hidrogen harus ditransportasikan sesuai dengan peraturan perundangan yang berlaku untuk pengaturan transportasi bahan berbahaya (mudah terbakar). Personil yang melakukan

transportasi hidrogen harus terlatih menangani keadaan gawat darurat yang mungkin muncul saat kendaraan tersebut berada di jalan.

7.6.5 Kegiatan penyimpanan dan pemindahan

Pedoman umum dalam kegiatan penyimpanan dan pemindahan hidrogen antara lain:

- Jangan mengisi bejana penyimpan cairan secara berlebih.
- Jangan memberikan tekanan berlebih pada setiap bagian sistem.
- Hindari siklus termal sistem pelepas tekanan.
- Hangatkan dan bersihkan bejana hidrogen cair secara berkala untuk mempertahankan jumlah oksigen yang terakumulasi dalam bejana kurang dari 2%.
- Grounding-kan secara elektrik sistem yang bergerak dan statis sebelum melakukan penyambungan.
- Waspada terhadap kebocoran dan hentikan kegiatan jika terjadi kebocoran atau kebakaran.
- Jangan mendinginkan bejana penyimpanan hidrogen cair terlalu cepat.
- Periksa kerusakan akibat korosi atau kerusakan lainnya pada sistem.
- Pertahankan agar area sekitar sistem hidrogen bersih.
- Tunda atau hentikan kegiatan selama terjadi badai listrik, atau adanya gejala akan terjadinya badai listrik.
- Jaga area penyimpanan dan pemindahan dari personel dan peralatan yang tidak berkepentingan.
- Jauhkan/ cegah terjadinya sumber nyala api dari area kegiatan.
- Gunakan "sistem kerja secara berpasangan" (lihat 3.11.)
- Gunakan tanda-tanda seperti penghalang, tanda peringatan dan tali untuk menentukan area pengendalian terhadap akses kegiatan.

7.6.6 Prosedur operasi

Prosedur atau daftar pemeriksaan yang telah ditetapkan harus dilaksanakan dalam pengoperasian sistem hidrogen. Prosedur dan daftar pemeriksaan harus dikembangkan oleh personel yang ahli, ditinjau secara berkala dan disetujui oleh personel yang berwenang sebelum digunakan. Prosedur dan daftar pemeriksaan harus menyediakan informasi mengenai instruksi langkah-langkah yang harus dilakukan jika terjadi kebocoran atau kejadian tidak normal lainnya, dan prosedur penggunaan peralatan khusus (seperti APD dan peralatan monitoring).

Prosedur yang ditetapkan harus berisi sekurangnya meliputi prosedur pembersihan, pendinginan, pengoperasian, penyimpanan (khususnya pengisian), transfer hidrogen, pemeriksaan kebocoran, modifikasi, perbaikan, pemeliharaan dan penghentian.

7.6.7 Prosedur keselamatan

7.6.7.1 Umum

Keselamatan personel yang berada di dalam dan di dekat fasilitas hidrogen harus ditinjau secara seksama, dengan prosedur tanggap darurat yang harus dikembangkan sejak perencanaan dan desain awal.

Pengembangan perencanaan untuk berbagai jenis keadaan darurat, seperti kebakaran dan ledakan, harus dilakukan sehingga prioritas pertama adalah mengurangi risiko terhadap kehidupan.

Pertimbangan harus diberikan untuk pengembangan dan pelatihan prosedur keadaan darurat untuk kejadian-kejadian yang mungkin terjadi, seperti:

- kebocoran hidrogen (kebocoran yang dapat dikendalikan dan tidak dapat dikendalikan),
- kebakaran hidrogen,
- ledakan hidrogen,
- kelebihan tekanan,
- kontaminasi hidrogen (dengan pengoksida atau gas *inert*),
- retakan pada jalur hidrogen,
- tumpahan hidrogen cair,
- migrasi asap yang dapat terbakar,
- kebakaran akibat listrik,
- kegagalan peralatan kritis, dan
- ketidakmampuan untuk mengeluarkan gas dingin melalui ventilasi atau kegagalan sistem hidrogen cair.

7.6.7.2 Prosedur keadaan darurat

Persyaratan yang harus diperhatikan dalam prosedur keadaan darurat adalah:

- adanya prosedur evakuasi dan arah evakuasi pada saat keadaan darurat.
- adanya prosedur yang harus diikuti oleh pegawai yang tetap tinggal dalam keadaan kritis sebelum mereka dievakuasi;
- prosedur yang harus diikuti oleh semua pegawai setelah evakuasi keadaan darurat;
- adanya petugas penolong dan kesehatan bagi semua karyawan tersebut;
- adanya kelengkapan pelaporan kebakaran dan keadaan darurat lainnya;
- adanya prosedur dan tanggungjawab pegawai yang bertugas jika terjadi keadaan darurat;
- adanya respon awal terhadap tanggap darurat yang tepat dari setiap personil;
- menjaga dan membangun komunikasi;
- menyediakan respon medis;
- menjalin bantuan dari luar jika diperlukan;
- adanya petugas keamanan;
- adanya liputan media yang tepat;
- operasi penyelamatan dan restorasi;
- melibatkan pos komando sesuai jalur kewenangannya;
- membuat daftar bahan-bahan berbahaya (termasuk bahan seperti asbestos).

Sistem peringatan keadaan darurat harus tersedia untuk memperingatkan personil, jika terjadi keadaan gawat darurat. Prosedur keadaan darurat harus ditinjau secara berkala untuk memastikan bahwa prosedur tersebut masih sesuai dan selalu diperbaharui. Petugas keselamatan dan pemadam kebakaran harus dilibatkan dalam pengembangan prosedur dan latihan keadaan darurat.

7.6.7.3 Prosedur pemadaman kebakaran

Kebakaran hidrogen baru dapat dipadamkan, jika suplai gas sudah dihentikan. Jika tidak, gas yang tidak terbakar dapat menyebabkan terjadinya campuran yang mudah meledak. Semprotkan air untuk menjaga fasilitas tetap dingin.

7.6.7.4 Prosedur penanganan tumpahan cairan

Jika terjadi tumpahan cairan hidrogen, matikan katup aliran utama di hulu. Jangan melakukan tindakan apapun di sekitar area tumpahan, kecuali melakukan evakuasi, sampai penguapan cairan dan penyebaran gas mencapai konsentrasi di bawah batas mampu bakar.

Penggunaan tanggul atau penghalang lainnya hanya boleh dilakukan dengan sangat hati-hati karena adanya peningkatan efek detonasi sebagai akibat adanya penutupan.

Hidrogen cair yang menguap akan terkondensasi dengan cepat menjadi air di udara, dan membentuk awan putih serta mudah terbakar.

7.7 Tindakan yang direkomendasikan untuk organisasi

7.7.1 Umum

Organisasi-organisasi yang terlibat dalam penggunaan hidrogen harus menerbitkan dan mengeluarkan kebijakan dan prosedur yang diperlukan untuk memastikan bahwa hidrogen digunakan dengan aman. Kebijakan dan prosedur organisasi harus menyebutkan penanggung jawab keselamatan, resiko dan manajemen resiko, peraturan pelaksanaan, standar, dan petunjuk pelaksanaan organisasi. Budaya keselamatan harus ditanamkan pada setiap personil di dalam organisasi agar personil selalu ingat tentang keselamatan sepanjang waktu, khususnya pada saat melakukan tugas organisasi. Komitmen pimpinan terhadap aspek keselamatan pada saat bekerja dengan hidrogen sangat diperlukan, sebagai indikasi pentingnya aspek keselamatan bagi organisasi.

7.7.2 Pengendalian melalui kebijakan dan prosedur organisasi

Manajemen organisasi harus menerbitkan kebijakan dan prosedur organisasi yang mana program atau proyek yang melibatkan hidrogen diarahkan, diatur, dikendalikan, dipantau, dan dievaluasi. Manajemen tingkat atas juga harus menyediakan pengendalian, pedoman, dan supervisi program atau proyek untuk memastikan bahwa perencanaan, pengawasan, pelaporan, pengevaluasian, dan pengkajian program atau proyek telah dicapai. Kebijakan dan prosedur organisasi yang tepat harus diterbitkan yang menyediakan konsep pengendalian pada fasilitas, sistem, atau produk hidrogen.

7.7.3 Penggunaan prosedur dan daftar periksa yang telah disetujui

Prosedur dan daftar periksa harus disiapkan dan digunakan untuk semua pengoperasian sistem hidrogen. Prosedur yang tidak memadai dan ketidaktaatan dalam mengikuti prosedur, umumnya sebagai faktor terjadinya kecelakaan hidrogen.

7.7.4 Tinjauan yang tepat

Tinjauan, seperti tinjauan desain, tinjauan keselamatan, analisis bahaya, dan tinjauan operasional, verifikasi dilakukan oleh tim personil yang berkualitas dan berpengalaman.

7.7.5 Program pemeliharaan dan pengendalian mutu yang disetujui

Program pemeliharaan dan pengendalian mutu harus digunakan untuk memastikan bahwa sistem hidrogen yang terpasang dan dioperasikan dalam kondisi aman melalui pemeriksaan dan penggantian komponen sesuai dengan keperluan dan berdasarkan jadwal yang rutin.

7.7.6 Pelatihan personil

Program pelatihan keselamatan yang detail yang memperhatikan kemampuan dan keterbatasan manusia harus diberlakukan untuk semua personil yang terlibat dalam penggunaan hidrogen. Tujuan utama program pelatihan personil adalah mengeliminasi kecelakaan dan meminimalkan keparahan kecelakaan yang terjadi.

Seluruh personil yang terlibat dalam penggunaan hidrogen (termasuk operator, teknisi, insinyur, perancang, dan administrator) harus mengetahui sifat-sifat fisika, kimia, dan bahaya hidrogen yang bersinggungan dengan penggunaannya. Personil yang terlibat dalam aktivitas seperti desain peralatan dan perencanaan operasi harus dilatih dengan hati-hati sehingga dapat memahami standar dan pedoman yang telah diterima, serta mengikuti pedoman dan persyaratan yang tepat. Operator harus dilatih dalam penggunaan peralatan khusus secara tepat dan sistem yang melibatkan mereka dalam operasi. Operator harus memiliki sertifikat yang menunjukkan kemampuan untuk mengoperasikan peralatan dan sistem hidrogen.

Operator harus dilatih, bagaimana merespon keadaan darurat termasuk peralatan dan sistemnya. Pelatihan meliputi tindakan yang harus dilakukan dalam keadaan gawat darurat, seperti kebakaran atau ledakan. Personil harus dilatih untuk membantu evakuasi personil dalam keadaan darurat dengan aman dan berurutan. Latihan meliputi prosedur pencegahan dan prosedur pertolongan pertama pada korban cedera saat gawat darurat termasuk prosedur untuk cedera terbakar dingin dan kriogenik di mana hidrogen gas dingin dan hidrogen cair terlibat.

Pelatihan personil harus dilakukan secara berkala (biasanya setahun sekali). Program pelatihan keselamatan harus ditinjau secara periodik untuk memastikan bahwa program pelatihan ini masih relevan dan diperbaharui.

7.7.7 Kajian bahaya

Hidrogen umumnya diklasifikasikan sebagai bahan berbahaya karena sifatnya yang mudah terbakar. Ketika bekerja dengan hidrogen, berbagai aspek keselamatan harus dievaluasi untuk memastikan bahwa rancangan dan implementasi sistem cukup memenuhi aspek keselamatan. Salah satu metode yang memenuhi persyaratan aspek keselamatan adalah penggunaan identifikasi/kajian bahaya. Suatu kajian bahaya akan mengidentifikasi bahaya dan penurunan efisiensi operasi dalam proses atau prosedur yang telah dipelajari dan secara khusus mengevaluasi respon dari sistem terhadap penyimpangan pada desain awal. Prosedur kajian tingkat bahaya terdiri atas pembuatan dokumen berdasarkan penyebab, konsekuensi, upaya perlindungan, dan rekomendasinya.

Lampiran A
(informatif)

Sifat – sifat hidrogen

Tabel A.1 - Data sifat fisik dan termofisik hidrogen normal dan parahidrogen yang berkaitan dengan keselamatan

Sifat ^a	Hidrogen normal	Para-hidrogen
Sifat pada temperatur dan tekanan normal (NTP)		
Temperatur, K	293,15	293,15
Tekanan (absolut), kPa	101,325	101,325
Densitas, kg/m ³	0,083 76	0,083 76
Kalor spesifik pada tekanan konstan (c_p), kJ/kg.K	14,33	14,89
Rasio kalor spesifik (c_p/c_v)	1,416	1,383
Entalpi, kJ/kg	4 129,1	4 097,7
Energi dalam, kJ/kg	2 919,5	2 888,0
Entropi, kJ/kg.K	70,251	64,437
Kecepatan suara, m/detik	1 294	1 294
Viskositas, μ Pa.detik	8,81	8,81
Konduktifitas termal, mW/m.K	183,8	191,4
Kalor pada konversi dari normal ke para-hidrogen pada 300K, kJ/kg	27,56	-
Ekspansifitas volume, K ⁻¹	0,003 33	0,003 33
Sifat-sifat pada titik kritis (CP)		
Temperatur, K	33,19	32,976
Tekanan (absolut), kPa	1 315	1 292,8
Densitas, kg/m ³	30,12	31,43
Kalor laten vaporisasi, kJ/kg	0	0
Kalor spesifik pada tekanan konstan (c_p), kJ/kg.K	Sangat besar	Sangat besar
Rasio kalor spesifik, (c_p/c_v)	Besar	Besar
Entalpi, kJ/kg	577,4	38,5
Energi dalam, kJ/kg	-	2,8
Entropi, kJ/kg.K	27,07	17,6
Kecepatan suara, m/detik	-	350
Viskositas, μ Pa.detik	(3,5)	3,5
Konduktifitas termal, mW/m.K	Anomali Besar	Anomali Besar
Sifat-sifat pada titik didih normal (NBP)		
Temperatur, K	20,930	20,268
Tekanan (absolut), kPa	101,325	101,325
Densitas, kg/m ³	1,331 (V) 70,96 (L)	1,338 (V) 70,78 (L)
Kalor laten vaporisasi, kJ/kg	446,0	445,6
Kalor spesifik pada tekanan konstan (c_p), kJ/kg.K	12,20 (V) 9,772 (L)	12,15 (V) 9,688 (L)
Rasio kalor spesifik (c_p/c_v)	1,683 (V) 1,698 (L)	1,869 (V) 1,688 (L)
Entalpi, kJ/kg	717,98 (V) 272,0 (L)	189,3 (V) -256,3 (L)

Tabel A.1 (Lanjutan)

Sifat	Hidrogen Normal	Para-hidrogen
Energi dalam, kJ/kg	641,9 (V) 270,7 (L)	113,6 (V) -257,7 (L)
Entropi, kJ/kg.K	39,16 (V) 17,32 (L)	29,97 (V) 7,976 (L)
Kecepatan suara, m/detik	357 (V) 1 101 (L)	355 (V) 1 093 (L)
Viskositas, $\mu\text{Pa}\cdot\text{detik}$	1,1 (V) 13,2 (L)	1,1 (V) 13,2 (L)
Konduktifitas termal, mW/m.K	16,9 (V) 99,0 (L)	16,9 (V) 99,0 (L)
Ekspansifitas volume, K^{-1}	0,064 2 (V) 0,016 4 (L)	0,064 2 (V) 0,016 4 (L)
Kalor konversi dari normal ke para-hidrogen pada, kJ/kg	527,14	-
Sifat-Sifat pada titik tripel (TP)		
Temperatur, K	13,957	13,803
Tekanan, kPa	7,205	7,042
Densitas, kg/m^3	0,129 8 (V) 77,21 (L) 86,71 (S)	0,125 6 (V) 77,021 (L) 88,50 (S)
Kalor spesifik pada tekanan konstan (c_p), kJ/kg.K	10,53 (V) 6,563 (L) - (S)	10,52 (V) 6,513 (L) - (S)
Rasio kalor spesifik (c_p/c_v)	1,695 (V) 1,388 (L) - (S)	1,693 (V) 1,382 (L) - (S)
Kalor laten vaporisasi, kJ/kg	452,0	449,2
Kalor laten fusi, kJ/kg	58,09	58,29
Kalor laten sublimasi, kJ/kg	-	507,39
Entalpi, kJ/kg	669,67 (V) 217,6 (L) 159,5 (S)	140,3 (V) -308,9 (L) -367,2 (S)
Energi dalam, kJ/kg	612,52 (V) 215,8 (L) 157,7 (S)	84,23 (V) -309,0 (L) -367,3 (S)
Entropi, kJ/kg.K	46,4 (V) 14,2 (L) 10,1 (S)	37,52 (V) 4,961 (L) 0,739 (S)
Kecepatan suara, m/detik	307 (V) 1 282 (L) — (S)	305 (V) 1 273 (L) — (S)
Viskositas, $\mu\text{Pa}\cdot\text{detik}$	0,74 (V) 26,0 (L) — (S)	0,74 (V) 26,0 (L) — (S)
Konduktifitas termal, mW/m.K	12,4 (V) 73,0 (L) 900 (S)	12,4 (V) 73,0 (L) 900 (S)
Ekspansifitas volume, K^{-1}	0,075 2 (V) 0,010 2 (L)	0,075 2 (V) 0,010 2 (L) 0,004 94 (S)

Tabel A.1 (Lanjutan)

Sifat	Hidrogen Normal	Para-hidrogen
Sifat-sifat Lainnya		
Massa molekul	2,015 94	2,015 94
Volume gas ekuivalen pada NTP/volume cair NBP	847,1	845,1
Volume gas ekuivalen pada CP/volume cair NBP	2,357	2,252
Volume gas ekuivalen pada NBP/volume cair NBP	53,30	52,91
Volume gas ekuivalen pada TP/volume cair NBP	546,3	563,8
Volume cair ekuivalen pada TP/volume cair NBP	0,919 0	0,919 0
Volume solid ekuivalen pada TP/volume cair NBP	0,818 4	0,818 1
Tekanan yang diperlukan untuk menjaga densitas cair NBP pada NTP GH_2 (volume tetap, tanpa ventilasi), MPa		172 ^b
Temperatur inversi maksimum Joule-Thomson, K		200
Koefisien difusi pada udara NTP, cm^2/detik		0,61
Kecepatan difusi pada udara NTP, cm/detik		$\leq 2,0$
Kecepatan <i>buoyant</i> pada udara NTP, m/detik		1,2 s/d 9
Laju vaporisasi (<i>steady state</i>) pada kolam cair tanpa terbakar, mm/s		0,42 s/d 0,83
CATATAN 1 (L): fase cair CATATAN 2 (S): fase padat CATATAN 3 (V): fase uap CATATAN 4 c_v : kalor spesifik pada volume konstan, $\text{kJ}/\text{kg.K}$ CATATAN 5 angka pada <i>parentheses</i> merupakan perkiraan		
^a Kecuali dispesifikasi, sumber data pada referensi [9]		
^b Nilai yang dikalkulasi		

Tabel A.2 - Perbandingan sifat termofisik antara gas hidrogen dengan gas lain yang berkaitan dengan keselamatan

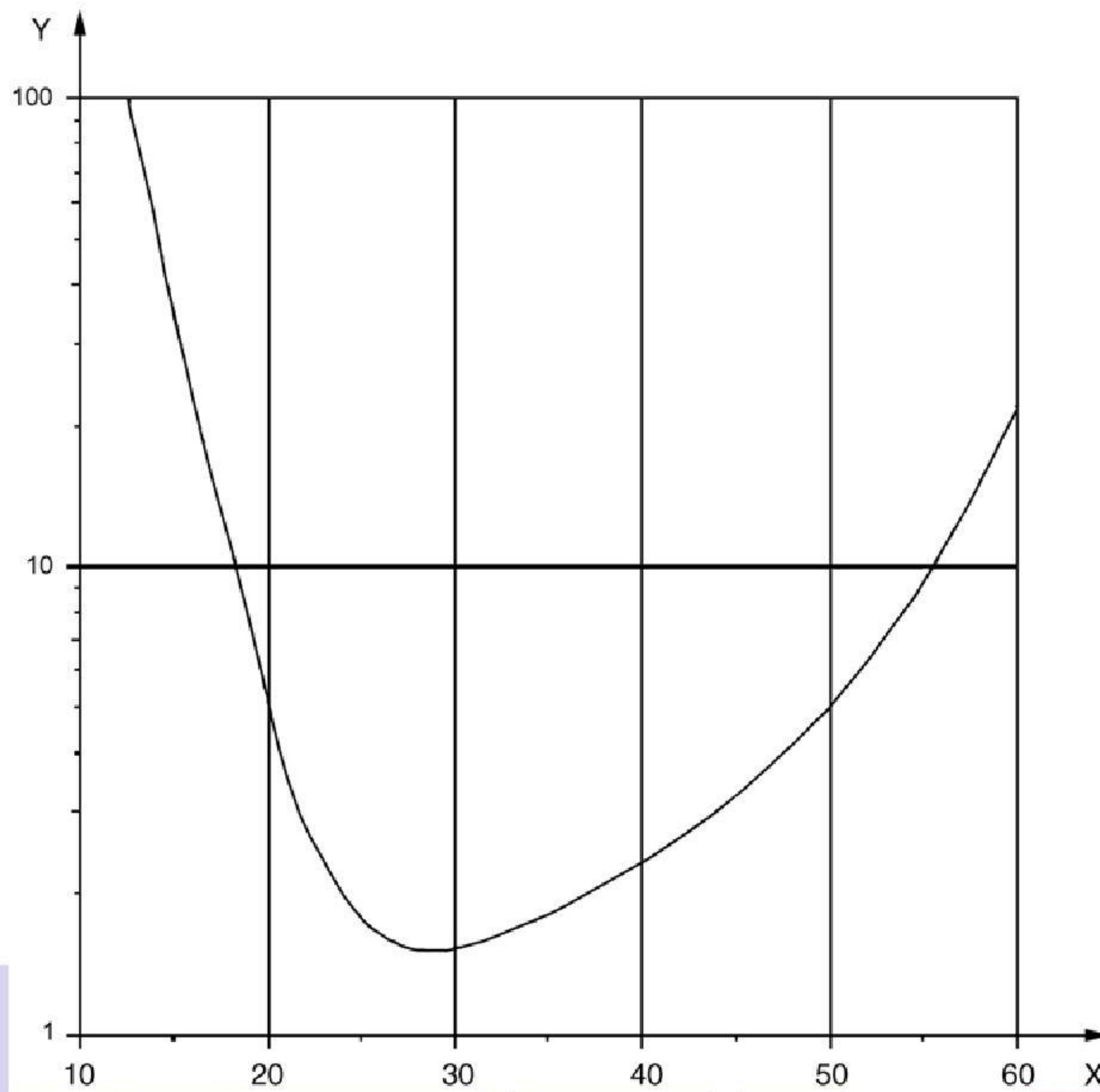
Gas	Densitas pada 20°C dan 100 kPa kg/m^3	Viskositas pada 20°C dan 100 kPa $\mu\text{Pa}.\text{detik}$	Koefisien Difusi di udara cm^2/detik	Nilai kalor bawah l. MJ/kg
Hidrogen (H_2)	0,082 7	8,814	0,61	119,93
Helium (He)	0,164 0	19,609	0,57	0,00
Metana (CH_4)	0,659 4	11,023	0,16	50,02
Nitrogen (N_2)	1,149 6	17,637	0,20	0,00

Lampiran B
(Informatif)

Data pembakaran hidrogen

Tabel B.1 - Sifat-sifat pembakaran para-hidrogen yang berhubungan dengan keselamatan

Sifat	Nilai ^a
Panas pembakaran, kJ/kg	119,93 (rendah) 141,86 (tinggi)
Batas flamibilitas, fraksi vol, %	4,0 s/d 75 (pada udara NTP) ^b 4,1 s/d 94 (pada oksigen NTP) ^{b, c}
Batas detonasi, fraksi vol, %	18,3 s/d 59 (pada udara NTP) ^b 15 s/d 90 (pada oksigen NTP) ^{b, c}
Komposisi stoikiometrik di udara, fraksi vol, %	29,53
Energi penyalaan (minimum) untuk penyalaan di udara, mJ	0,017
Temperatur penyalaan otomatis, K	858 ^d
Temperatur penyalaan (udara panas), K	943
Temperatur nyala api di udara, K	2 318
Radiasi energi panas dari pembakaran ke lingkungan, %	17 s/d 25
Kecepatan membakar pada udara NTP, m/detik	2,65 s/d 3,25
Kecepatan perambatan deflagrasi pada stoikiometri campuran H ₂ /udara, m/detik	975
Kecepatan perambatan detonasi di udara NTP, m/detik	1 480 s/d 2 150
Jarak eksperimen maksimum pada udara NTP, cm	0,008
Jarak <i>quenching</i> pada udara NTP, cm	0,064
Jarak induksi detonasi (L/D) di udara NTP	~ 100
Indeks batas oksigen, fraksi vol, %	5,0
Laju membakar dari cairan yang tertumpah (<i>spilled</i>), mm/detik	0,5 s/d 1,1
Energi ledakan (peledakan teoritis)	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> g TNT/g H₂ g TNT/kJ H₂ kg TNT/m³ NTP GH₂ g TNT/cm³ NBP LH₂ </div> <div> ~ 24 ~ 0,17^e 2,02 1,71 </div> </div>
CATATAN 1 NTP: temperatur dan tekanan normal (293,15 K dan 101,325 kPa)	
CATATAN 2 NBP: titik didih normal (20,268 K dan 101,325 kPa)	
CATATAN 3 TNT: trinitrotoluene simetris (energi ledakan 4 602 J/g TNT)	
^a Kecuali spesifik, data terdapat pada referensi [9].	
^b Nilai yang umum digunakan, dianjurkan hanya digunakan sebagai panduan. Sifat ini merupakan fungsi dari beberapa variabel yang divelulasi untuk dideterminasi nilainya pada aplikasi spesifik.	
^c Sumber data dari referensi [8].	
^d Nilai temperatur penyalaan sendiri hidrogen di udara bervariasi dari 773 K hingga 858 K. Variasi ini mungkin terjadi karena pengaruh dari perbedaan material yang digunakan pada eksperimen. Lihat referensi c untuk sumber data.	
^e Berdasarkan nilai-atas kalor pembakaran.	



Keterangan

X Konsentrasi hidrogen, fraksi volume (%)
Y lebar sel detonasi, cm

Gambar B.1 - Lebar sel detonasi untuk campuran hidrogen/udara pada 101,3 kPa (14,7 psia) [10]



Tabel B.2 - Sifat penyalan dan pembakaran beberapa jenis bahan bakar pada campuran dengan udara pada 25°C dan 101,3 kPa

Bahan bakar	Batas bawah mampu nyala Fraks vol%	Batas bawah detonasi Fraks vol%	Campuran stoikiometri Fraks vol%	Batas atas detonasi Fraks vol%	Batas atas mampu nyala Fraks vol%	Energi penyalan minimum ml	Temperatur penyalan sendiri °C	Kecepatan pembakaran laminar cm/detik
Hidrogen (H ₂)	4,0	18,3	29,5	59,0	75,0	0,017	585	270
Metanol (CH ₃ OH)	6,0	Tidak ada data	12,3	Tidak ada data	36,5	0,174	385	48
Metana (CH ₄)	5,3	6,3	9,5	13,5	17,0	0,274	537	37
Propana (C ₃ H ₈)	1,7	3,1	4,0	9,2	10,9	0,240	450	47
Bensin ^a (C ₈ H ₁₈)	1,0	1,1	1,9	3,3	6,0	0,240	215	30
CATATAN Data sifat fisik yang terdapat pada Tabel 2 tidak didefinisikan secara jelas, belum mendeterminasikan prosedur standar. Maka, data – data di atas hanya perbandingan antara gas – gas yang mampu nyala dan tidak dapat diaplikasikan secara langsung pada perancangan instalasi, komponen, ataupun pertimbangan keselamatan.								
^a Data untuk oktana, komposisi bensin kemungkinan dapat berbeda berdasarkan sumber produksi								

Lampiran C (Informatif)

Data material

C.1 Kriteria pemilihan material

Komponen dan sistem hidrogen memerlukan banyak jenis material, baik logam maupun non-logam (seperti polimer). Setiap material yang diperlukan (sepertiudukan, *seal*, adesif, pelumas, insulasi listrik, pegas, baut, dan perpipaan) harus dievaluasi dengan teliti pada perencanaannya, operasi, dan konsisi darurat apabila terdapat kemungkinan terpapar hidrogen.

Pemilihan material yang sesuai untuk sistem hidrogen melibatkan beberapa faktor. Pertimbangan-pertimbangan dalam pemilihan material untuk digunakan pada sistem hidrogen antara lain:

- Kompatibilitas dengan hidrogen (dengan titik berat pada penggetesan hidrogen, hidrogen *attack*, *hydriding*, porositas, peresapan, dan difusi);
- Kompatibilitas dengan sambungan antar material (sifat material pada perubahan temperatur dan tekanan, contohnya, perubahan yang terjadi pada bentuk dan dimensi material pada perubahan kedua parameter tersebut);
- Kompatibilitas dengan kondisi penggunaan (pengaruh terhadap temperatur dan tekanan, sebagai contoh, perubahan yang terjadi pada sifat keuletan dan ekspansi material apabila terjadi perubahan kondisi operasi);
- Kompatibilitas dengan lingkungan atau pemaparan (contohnya, kondisi material yang berada di lingkungan yang korosif atau bertemperatur tinggi akibat nyala api hidrogen atau api akibat material didekatnya)
- Toksisitas (pertimbangan atas toksik yang terkandung pada material harus dilakukan ketika diperlukan);
- Jenis kegagalan (contohnya, material yang gagal akibat getas dengan cepat dan material ulet dengan separasi lambat);
- Kemampuan fabrikasi menjadi bentuk yang diperlukan (permesinan, pengelasan, dan penekukan);
- Nilai ekonomi;
- Ketersediaan di pasar.

Sebagian besar dari pertimbangan di atas dilakukan untuk pemilihan material pada berbagai keperluan.

C.2 Hydrogen embrittlement [Dihapus]

Penggetesan hidrogen dapat menyebabkan deteriorasi yang signifikan terhadap sifat mekanis material. Pada penggetesan hidrogen, terdapat banyak faktor yang berpengaruh, antara lain temperatur dan tekanan lingkungan, konsentrasi hidrogen, lama pemaparan hidrogen, tegangan yang terjadi pada material, sifat fisik dan mekanis, struktur mikro, kondisi permukaan, pola retak yang terjadi pada material. Data beberapa material terhadap penggetesan hidrogen terdapat pada tabel C.1.

Meskipun material dapat terpapar hidrogen (menjadi sangat getas), mungkin jenis material tersebut masih dapat digunakan untuk keperluan hidrogen yang lain. Sebagai contoh, silinder gas bertekanan yang telah lama dan sesuai digunakan untuk penyimpanan dan pemindahan hidrogen bertekanan biasanya terbuat dari baja paduan 4130 X.

Tabel C.1 - Tingkat penggetasan hidrogen pada material logam umum

Logam	Sangat getas	Getas	Cukup getas	Sedikit getas
Aluminium paduan				
1100				X
6061-T6				X
7075-T73				X
Paduan Be-Cu 25			X	
Tembaga, OFHC				X
Nickel 270		X		
Baja				
Baja paduan, 4140	X			
Baja karbon				
1020		X		
1042 (normalisasi)		X		
1042 (<i>quenched</i> dan di temper)	X			
Baja <i>Maraging</i> , 18 Ni-250	X			
Baja stainless				
A286				X
17-7PH	X			
304 ELC			X	
305			X	
310				X
316				X
410	X			
440C	X			
Inconel 718	X			
Titanium dan paduan titanium				
Titanium			X	
Ti-5Al-2.5Sn (ELI)		X		
Ti-6Al-4V (anil)		X		
Ti-6Al-4V (STA)		X		

C.3 Pengaruh temperatur rendah

C.3.1 Umum

Pemilihan terhadap material untuk digunakan pada sistem hidrogen cair didasarkan pada sifat mekanis material, seperti kekuatan tarik dan kekuatan luluh, keuletan, kekuatan terhadap beban kejut, dan insensivitas penandaan. Material yang dipilih harus memiliki nilai minimum dari sifat-sifat ini pada seluruh rentang temperatur pada operasi, dengan pertimbangan lain berupa kondisi darurat, seperti kebakaran akibat hidrogen. Material harus memiliki metalurgi yang stabil, sehingga pada siklus termal yang berulang, tidak terjadi perubahan fase struktur kristal.

Pertimbangan-pertimbangan yang dilakukan pada pemilihan material untuk digunakan pada hidrogen cair pada temperatur 20 K antara lain:

- transisi dari ulet menjadi getas sebagai fungsi dari temperatur;
- bentuk deformasi plastis, terutama pada kondisi tidak konvensional, seperti pada temperatur yang sangat rendah;
- pengaruh ketidakstabilan metalurgi dan perubahan fase terhadap struktur kristal pada sifat mekanis dan elastis.

Dua pertimbangan utama pada pemilihan material untuk digunakan pada hidrogen cair adalah keuletan pada temperatur sangat rendah (penggetasan pada temperatur rendah) dan kontraksi termal.

C.3.2 Penggetasan pada temperatur rendah

Perubahan sifat material dari ulet menjadi getas seringkali terjadi karena terjadi penurunan temperatur. Perubahan ini terjadi pada temperatur yang berada jauh di atas temperatur *cryogenic*.

Untuk mengindikasikan transisi dari ulet menjadi getas, dapat dilakukan uji Charpy yang dilakukan sebagai fungsi dari temperatur. Indikasi lain dari perubahan ini dapat diketahui melalui hubungan antara kekuatan tarik dan kekuatan luluh material sebagai fungsi dari temperatur. Ketika nilai kekuatan luluh material mencapai kekuatan tariknya ketika temperatur menurun, maka material tersebut semakin bersifat getas.

Secara umum, material yang bertransisi dari ulet menjadi getas pada temperatur di atas 20 K tidak untuk digunakan pada hidrogen cair, kecuali dengan pertimbangan dan analisis yang mendalam. Polimer secara umum dilarang penggunaannya pada hidrogen cair karena polimer dapat menjadi getas pada temperatur yang jauh lebih tinggi daripada temperatur hidrogen cair.

C.3.3 Kontraksi termal

Secara umum, karena koefisien ekspansi yang positif, material akan berekspansi ketika terjadi kenaikan temperatur (kecuali material tertentu). Rentang temperatur yang terjadi antara lingkungan dengan hidrogen cair adalah 280 K. Pada sebagian besar material, penurunan temperatur akan menyebabkan kontraksi termal yang signifikan. Maka, fenomena ini harus diperhitungkan pada material yang digunakan pada hidrogen cair. Koefisien ekspansi termal merupakan fungsi dari temperatur.

Nilai kontraksi termal untuk perubahan temperatur dari lingkungan ke temperatur *cryogenic* untuk beberapa jenis material adalah sebagai berikut:

- sekitar 0,3% pada paduan besi;
- sekitar 0,4% pada aluminium;
- di atas 1% pada sebagian besar plastik.

Penggunaan plastik di antara dua permukaan logam (contohnya sebagai seal) akan menghasilkan kontraksi yang lebih besar 0,6 % dibandingkan dengan penggunaan logam.

C.4 Kesesuaian material untuk sistem hidrogen

Material yang digunakan pada sistem hidrogen harus dievaluasi secara seksama. Material yang dapat digunakan untuk hidrogen cair merupakan material yang data-datanya diketahui dan sesuai untuk digunakan. Material yang datanya tidak diketahui tidak boleh digunakan. Material yang digunakan diutamakan material yang sudah umum digunakan pada sistem hidrogen. Material yang umum digunakan untuk sistem hidrogen terdapat pada tabel C.2, yang hanya dapat digunakan sebagai panduan dan informasi.

Tabel C.2 - Penggunaan material pada hidrogen gas dan hidrogen cair

Material	Penggunaan pada hidrogen gas (GH ₂)	Penggunaan pada hidrogen cair (LH ₂)	Keterangan
LOGAM			
Aluminium dan paduannya	S	S	Sedikit terjadi penggetasan hidrogen.
Tembaga dan paduannya (kuningan, perunggu, tembaga-nikel)	S	S	Sedikit terjadi penggetasan hidrogen.
Besi, tuang, abu-abu, ulet	NS	NS	Tidak diijinkan digunakan berdasarkan kode dan standar.
Nikel dan paduannya (contoh: Inkonel dan Monel)	E	E	Dibutuhkan evaluasi. Kemungkinan terjadi penggetasan hidrogen
Baja, <i>stainless</i> austenit dengan > 7% nikel (contoh: 304, 304L, 308, 316, 321, 347)	S	S	Dapat mengubah menjadi martensit apabila tegangan terjadi diatas titik luluh pada temperatur rendah.
Baja, karbon (contoh: 1020 dan 1042)	E	NS	Dibutuhkan evaluasi. Dapat terjadi penggetasan hidrogen. Terlalu getas untuk penggunaan <i>cryogenic</i> .
Baja, paduan rendah (contoh: 4140)	E	NS	Dibutuhkan evaluasi. Dapat terjadi penggetasan hidrogen. Terlalu getas untuk penggunaan <i>cryogenic</i> .
Baja, <i>stainless</i> martensit (contoh: 410 dan 440C)	E	E	Dibutuhkan evaluasi. Dapat terjadi penggetasan hidrogen.

Tabel - C2 (Lanjutan)

Material	Penggunaan pada Hidrogen gas (GH ₂)	Penggunaan pada Hidrogen cair (LH ₂)	Keterangan
Baja, nikel (contoh: 2,25; 3,5; 5 dan 9% Ni)	E	NS	Keuletan menghilang pada temperatur hidrogen cair
Titanium dan paduannya	E	E	Dibutuhkan evaluasi. Dapat terjadi penggetasan hidrogen.
NON-LOGAM			
Asbestos yang dilapisi teflon ^a	S	S	Dilarang digunakan karena bahaya karsinogenik
Karet Chloroprene (Neoprene ^a)	S	NS	Terlalu getas untuk penggunaan hidrogen
Serat Polyester (Dacron)	S	NS	Terlalu getas untuk penggunaan hidrogen
Karet Fluorocarbon (Viton ^a)	E	NS	Terlalu getas untuk penggunaan hidrogen
Lapisan Polyester (Mylar ^a)	S	NS	Terlalu getas untuk penggunaan hidrogen
Nitrile (Buna-N ^a)	S	NS	Terlalu getas untuk penggunaan hidrogen
Polyamides (nylon)	S	NS	Terlalu getas untuk penggunaan hidrogen
Polychlorotrifluoroethylene (Kel-F ^a)	S	S	
Polytetrafluoroethylene (Teflon ^a)	S	S	
CATATAN 1 S: Sesuai untuk digunakan CATATAN 2 NS : Tidak sesuai digunakan CATATAN 3 E: Dibutuhkan evaluasi apakah sesuai untuk digunakan pada kondisi kerja			
^a Teflon, Neoprene, Dacron, Mylar, Viton, Buna-N dan Kel-F merupakan contoh produk yang terdapat di pasaran secara komersial. Informasi ini diberikan untuk kemudahan menggunakan standar ini dan bukan merupakan pengesahan terhadap produk tersebut			

Lampiran D (Informatif)

Senyawa penyimpan hidrogen

D.1 Umum

Sistem penyimpanan dan transportasi hidrogen akan menggunakan senyawa kimia yang mengandung hidrogen untuk meningkatkan kepadatan energi untuk simpanan hidrogen dan mencegah kebutuhan penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi atau bersuhu rendah. Senyawa kimiawi ini merupakan materi energetik yang memiliki pertimbangan keselamatan sendiri dan harus ditangani dengan sesuai. Interaksi senyawa kimiawi dengan sistem hidrogen juga harus dipertimbangkan.

Berbagai jenis senyawa kimiawi, yang menggunakan mekanisme fisik yang berbeda, untuk penyimpanan hidrogen masih dalam penelitian. Hal ini meliputi bahan bakar cair, hidrida logam, hidrida organik cair, dan materi-materi yang lebih baru seperti *fullerens* (bentuk karbon yang terdiri dari 500 atom karbon yang dibentuk dalam tabung), nanotube serta karbon, dan mikrosfer gelas. Beberapa bahan bakar cair adalah methanol, metilsikloheksana (MCH), amonia, bensin, dan hidrazin. Sistem hidrida dapat menggunakan campuran logam, katalis, dan adukan cairan. Pertimbangan keselamatan ditampilkan dalam istilah umum karena perbedaan fisik yang sangat besar pada senyawa kimiawi ini dan sistem yang menggunakannya, kurangnya sifat bahaya materi yang lebih berbeda, dan berpotensi terhadap baru seperti sistem yang tidak ditentukan. Secara khusus, senyawa kimiawi yang umumnya digunakan dapat ditemukan ada lembar data materi keselamatan (Material Safety Data Sheets, MSDS) dan pada literatur keselamatan.

D.2 Pertimbangan keselamatan dasar senyawa kimiawi

Pertimbangan keselamatan dasar meliputi hal-hal yang berhubungan dengan sifat fisik dan sifat terbakar, isu penanganan dan toksisitas, dan pertimbangan khusus lainnya. Setidaknya, informasi keselamatan berikut, disertai dengan penyuplai MSDS, harus berhubungan dengan desain sistem dan menyampaikan desain tersebut ke risiko paparan:

- a) deskripsi umum bahan berbahaya yang umum atau khusus;
- b) sifat fisik;
- c) sifat mudah terbakar di udara;
- d) kompatibilitas materi;
- e) informasi penanganan;
- f) toksisitas;
- g) memadamkan kebakaran.

Lampiran E
(informatif)

Istilah dan definisi

[Dipindahkan ke pasal 3 Istilah dan definisi]



Lampiran F (informatif)

Daftar penyimpangan teknis dan penyimpangannya

Uraian/Pasal/Subpasal	Modifikasi
Prakata	Penambahan identitas adopsi modifikasi dari ISO/IEC Guide 21-1 dan juga beberapa penambahan informasi lainnya.
Pendahuluan	Penghapusan pasal
1 Ruang lingkup	Penghapusan kalimat "It identifies the basic safety concerns and risks, and describes the properties of hydrogen that are relevant to safety. Detailed safety requirements associated with specific hydrogen applications are treated in separate International Standards."
3 Istilah dan definisi	
3.15 code	Dihapus
3.91.2 celah pemadaman	Dihapus
3.100 standar	Dihapus
3.112 viscosity	Dihapus
4 Penggunaan hidrogen	
4.1.1 Kategori infrastruktur	Penghapusan kalimat "Some applications may involve all three categories"
4.1.2 Produksi	<p>Penghilangan paragraf berikut :</p> <p>Different means of hydrogen production are used for special applications. For example, some applications seek to minimize storage or hazards by supplying hydrogen (or oxygen with hydrogen as a by product) on demand. Several electrolyser technologies are under development for this purpose. Ultra-pure research-grade hydrogen and oxygen outputs are possible from these systems (tidak dituliskan).</p>
4.1.3.1 Umum	Penghilangan kalimat "This may change with more widespread use of hydrogen"
4.1.3.3 Penyimpanan dan transportasi hidrogen cair	Penghapusan kalimat "At present, slush hydrogen has only been considered as an aerospace propellant and

Uraian/Pasal/Subpasal	Modifikasi
4.1.4 Aplikasi penggunaan hidrogen	<p>the economics for production do not favour its more extensive use" dan penghapusan kalimat "Transport of liquid hydrogen is accomplished in vacuum-jacketed containers by truck, railcar or tanker, and upon delivery it is transferred to vacuum-jacketed cryogenic storage vessels at point-of-use sites. Storage systems as large as 3 700 000 litres are in use for aerospace applications. However, cryogenic liquid hydrogen cannot be stored indefinitely unless it is refrigerated, which is not economical for most applications. Liquid hydrogen is either used or eventually lost to the environment."</p> <ul style="list-style-type: none"> • Penghapusan kalimat "or augment the power grid" • Penambahan kalimat "untuk perumahan, dan sistem cadangan energi untuk <i>base transceiver station</i> (BTS) operator telpon selular" • Penjelasan: Penambahan kalimat terkait penggunaan hidrogen skala besar untuk meningkatkan daya listrik. • Penghapusan kalimat "The hydrogen is processed for storage and used with a fuel cell or a combined heat and power-generating unit to produce electricity on demand. Such systems may be further integrated to capture waste heat for heating or industrial processes. These applications consist of a component that performs the primary function and components that control, make safe, supply hydrogen, store hydrogen, or otherwise support the primary function."
4.4 Pengaruh terhadap lingkungan	<p>Penghapusan kalimat "This formation of water from hydrogen/oxygen reactions is well known by the outdoor observers of NASA Space Shuttle launches, who have, when the wind is right, experienced rain out of a clear blue sky".</p>
5 Persyaratan keselamatan penggunaan hidrogen gas dan cair	
5.1 Persyaratan umum	<p>Penghapusan kalimat "This list simply stresses where concern should be focussed in the design and operation of hydrogen systems. Exposure is placed last because of the realization that any of the first four hazards can result in consequences that far overshadow the consequences of exposure. Note this list does not detail specific hazards, or the possibility that different elements within the list can act together to form an overall hazard. These hazards and issues should be considered when evaluating hydrogen hazards. Because the operation of hydrogen systems may involve many people, the effort should be considered a team effort."</p>

Uraian/Pasal/Subpasal	Modifikasi
5.2.1 Umum	Penghapusan kalimat "A discussion of the correspondence between hydrogen properties and their associated potential hazards provides insight into safety issues" dan Some general safety-related properties of gaseous and liquid hydrogen are discussed below. Additional information on hydrogen's general safety-related properties as a gas and a liquid are summarized in Clause 6 and some selected property data is tabulated in Annex A."
5.3.1 Aspek-aspek pembakaran	Penghapusan kalimat ". Each of the factors necessary for combustion (a fuel, an oxidizer and an ignition source) can be represented on one of the three sides of a triangle, a concept known as a fire triangle."
5.3.3.3 Detonasi gas	Penyederhanaan kalimat "However, the presence of confining surfaces can act to expand the range of mixtures that are detonable and significantly reduce the ignition energy necessary for detonation. Detonations that impinge on surfaces are reflected such that the superposition of the incident and reflected pressure waves are cumulative, producing greater pressures of 2 to 3 times the incident shock pressure"
5.3.3.4 Detonasi pada fase cair atau kondensasi	Penyederhanaan kalimat "Solid oxidizer mixed in liquid hydrogen can be made to detonate with a yield similar to that of explosives. For this form of combustion to occur, the mixture needs to be subjected to an initiation source with an energy equivalent to a highly explosive charge. There is a lack of well-developed information characterizing this process".
5.6.1 Penggetasan hidrogen	<ul style="list-style-type: none"> • Penghapusan kalimat "The process takes place on freshly generated metallic surfaces that are likely to form on surface defects or other stress raisers as a result of stress-induced local plastic deformation processes. Impurities such as hydrogen sulfide dissociate into atomic hydrogen even more easily than molecular hydrogen." • Penghapusan frasa "(such as a Bourdon tube in a pressure gauge, or a storage vessel)"
5.7.4 Sesak nafas	Penghapusan kalimat "Smoke inhalation, one of the major causes of injury and a primary consequence of a fire, is considered less serious in the case of hydrogen, because the sole combustion product is water vapour. However, secondary fires can produce smoke or other combustion products that present a health hazard."
5.8 Pendekatan secara kelompok dan pelatihan yang diperlukan untuk penggunaan	Penghilangan kalimat "Measures taken by prudent organizations are described in Clause 7"

Uraian/Pasal/Subpasal	Modifikasi
hidrogen yang aman	
6 Sifat dasar hidrogen	
6.1.1 Sifat atom dan molekul	<p>Penghapusan kalimat "This apparent complexity of different isotopes and molecular states has little effect on most non-nuclearenergy safety considerations. Deuterium is found only in trace quantities in nature, and tritium is produced in nuclear reactors. The chemistry of hydrogen, and in particular the combustion chemistry, is little altered by the different atomic and molecular forms. Non-nuclear energy applications typically use thermophysical data that applies to normal hydrogen (protium). The only exception occurs for cryogenic applications such as liquid hydrogen storage, in which heat is an important parameter. The larger property differences between orthohydrogen and parahydrogen occur in those properties for which heat is important (such as enthalpy, specific heat capacity and thermal conductivity), whereas other properties of orthohydrogen, such as density, vary little from parahydrogen properties."</p>
6.2 Umum	<p>Penghapusan kalimat "Selected hydrogen engineering data for the gaseous and liquid phases are presented in 6.2 in order to give sufficient background to understand hydrogen safety issues. Some numerical data are tabulated in Annex A. Also selected data on other gases are provided in Annex A for comparison", sebagian dipindahkan ke 6.2.</p>
6.2.2.1 Dispersi	<p>Penghapusan kalimat "Note that the density of any gas is inversely proportional to temperature; for example, cooling a gas makes it denser."</p>
6.3.4 Deflagrasi	<p>Penghapusan kalimat "Beyond the flammability limit and the ignition energy data, it is difficult to quantify effects that produce flame acceleration. Confinement is necessary and, with initial conditions such as those near-stoichiometric mixtures and strong initiation sources, rapid deflagrations at the verge of transition to a detonation can occur within one metre of travel. Testing for specific scenarios is required to determine the potential for deflagration or even for detonation."</p>
7 Mitigasi dan pengendalian resiko	
7.1.1 Umum	<p>Penghapusan paragraf "There are general principles, guidelines and recommended practices that are essential for the safe use of hydrogen. While a given hydrogen application has the potential to be unique, priorities can be discerned in the application of these general</p>

Uraian/Pasal/Subpasal**Modifikasi**

principles based on the experience and lessons learned from mishaps involving hydrogen described in 7.1.2. Perspective on how an understanding of hydrogen hazards can be approached is provided in 7.1.3 and general guidelines on how to minimize hazards is provided in 7.1.4. More specific information has been organized into sections covering hydrogen design, flammability and explosion, detection, facilities, operations, and recommendations for organizations."

7.1.2 Pelajaran dari pengalaman

Penghapusan 3 paragraf berikut :

The lessons learned from past experiences provide valuable insight into the priorities that should be established for the application of recommended practices and guidelines. A 1974 study of 96 mishaps involving hydrogen identified and categorized the causal factors. A summary of the results is provided below with an assessment of the percentages involved. More than one factor may have been involved in some mishaps, consequently the percentage shown for these categories totals more than 100 %.

Several categories based on human error were identified. Operational and work area deficiencies were found responsible for 26 % of the mishaps. These mishaps were attributed to inadequate working conditions during installation, maintenance, fabrication, and cleaning; and the lack of training, specific instructions, or both. Procedural deficiencies were found responsible for 25 % of mishaps. This category included the failure to follow established procedures, or to prepare proper procedures. Design deficiencies were found responsible for 22 % of the mishaps. Here inadequate component or system designs, including failure to specify safety devices and omission of other essential information, failure to determine stress and fatigue, errors in material selection (such as clerical errors in drawings and specifications) were described as the causes. Planning deficiencies identified as limited planning, such as failure to prepare test plans or to prepare hazard studies, attributed to 14 % of the mishaps.

The first four categories account for 87 % of the mishaps. Of these, the first and second categories account for 51 % and involve operational procedures. The third and fourth categories account for 36 % and involve design and planning. Thus, these four categories account for a major share of the mishaps and involve human errors. Although not shown in the above numbers, valves were involved in 20 % of the mishaps, and systems contaminated with air were involved in 21 % of the mishaps.

Uraian/Pasal/Subpasal	Modifikasi
7.1.3 Penanggulangan Bahaya	<ul style="list-style-type: none"> • Penghapusan kalimat "This option might be illustrated by choosing to use an inert gas whenever possible rather than using hydrogen (eliminate the hazard by eliminating the hydrogen)." • Penghapusan kalimat "In this example, in comparison with the example above, the hydrogen is still used, but a material that is subject to embrittlement is not used". • Penyederhanaan kalimat "The option that is often the only one that is practical is to control a hazard. This involves controlling the elements of the hazard rather than eliminating, preventing, or avoiding them. This might involve, for example, limiting the pressure or flowrate that is used in an operation. • Penghapusan kalimat "If the consequences of a hazard are such that they are insignificant or that they can be tolerated, then an option that is available is to accept the hazard. This option usually involves a careful examination of the hazard and its consequences in order to justify the decision that it can be accepted.
7.2.1 Merancang kesadaran terhadap keselamatan	Penghilangan kalimat "Just as hydrogen has inherent hazards (hazards that are part of the essential nature of hydrogen), a hydrogen system or facility should have inherent safety features (safety is an essential characteristic that must be built-in)".
7.2.2.1 Umum	Penghilangan kalimat "Materials that are in contact with other materials should be compatible with each other, as well as with hydrogen and the use conditions."
7.2.3 Pertimbangan untuk bejana dan komponennya	Penghapusan kalimat ". Oxygen particulate in cryogenic hydrogen gas can deflagrate. Solid air in a liquid hydrogen piping system can plug lines and orifices, and can interfere with the operation of valves and other equipment."
7.2.5 Pertimbangan untuk perpipaan, sambungan, dan persambungan	<ul style="list-style-type: none"> • Penghapusan kalimat "The more corrosive (less noble) material will preferentially corrode and should be used for the female part." • Penyederhanaan kalimat "A bayonet joint is typically used for joints in liquid hydrogen piping, where frequent connection and disconnection (such as in fill lines) are necessary. If this is not possible, hydrogen gas or fire detectors should monitor the regions around the joints. Soft-solder (low melting point) joints should not be used for hydrogen service."
7.2.7.1 Umum	Penghapusan kalimat "A hydrogen system commonly

Uraian/Pasal/Subpasal**Modifikasi**

involves a considerable number of components, such as valves, pressure-relief devices, pressure regulators, check valves, filters, instrumentation and pumps. These components are important elements of the system and they can be crucial for the safety of the system. The components in a hydrogen system should be fabricated of materials, including soft goods such as seats and seals, that are compatible with the operating conditions, such as temperature and pressure, and with each other if more than one material is involved."

7.3.3.1 Sumber penyalan elektrik

Penghapusan kalimat "that cover the installation of electrical equipment in hazardous environments."

7.3.3.3 Sumber penyalan thermal

Penghapusan kalimat "Some applications that use such materials include recombining hydrogen emitted from lead-acid batteries to produce water and hydrogen detection instruments"

7.3.5 Pengkayaan oksigen

Penambahan kalimat "Beberapa hal berikut menjadi pertimbangan yang harus diperhatikan saat mentransfer hidrogen dalam jumlah yang besar yaitu:"

Perubahan format redaksi :

While liquid hydrogen is usually transferred in vacuum insulated lines, cold hydrogen flowing through tubes which are not sufficiently thermally insulated can easily cool the system below 90 K so that condensed air with an oxygen content of up to 52 % is present. This oxygen-enriched condensate enhances the flammability of materials and makes materials combustible that normally are not. If a line cannot be insulated, the area underneath should be free of any organic material. This includes bituminous road covers and similar material. This is of particular concern when transferring large quantities of hydrogen.

menjadi 2 butir.

7.4.2 Pendeteksi api

Penghapusan kalimat "As a consequence of these two characteristics of a hydrogen flame"

Penghapusan kalimat "A variety of methods and detector types are available for the detection of a hydrogen flame."

7.6.2 Alat perlindungan diri

Penghapusan kalimat "Procedures that are established for operations involving hydrogen should describe the personal protective equipment (PPE) that is needed for the operations to be performed. Some general guidelines for PPE that should be considered beneficial in working with hydrogen are summarized below. These guidelines do not address PPE that should be considered when involved in other activities such as working on electrical

Uraian/Pasal/Subpasal	Modifikasi
	<p>circuits or performing a cleaning or decontamination operation”.</p> <p>Menjadi “APD yang diperlukan untuk pengoperasian yang menggunakan hidrogen harus menggunakan prosedur yang ditentukan”.</p>
7.6.3 Pendinginan	<p>Penghapusan 2 paragraf berikut:</p> <p>The cool-down process can result in large temperature gradients, both circumferential and radial, which can create large stresses in the containment structure or components such as valves. Also, cool-down can result in large thermal contraction (especially in a long line), which can create large stresses in the line. Non-uniform cooling can result when two-phase flow occurs. Stratified flow can result in large circumferential temperature gradients, which in turn create high stresses in a pipe. Stratified or wave flow (usually associated with low flowrates) can result in pipe bowing, which is produced when the bottom part of a pipe contracts more than the top part, because the bottom part is cooled by the liquid and the top part is cooled by the gas.</p> <p>The cool-down process generally results in the generation of a large quantity of gas that needs to be handled safely. The system should be designed to accommodate the large gas flow that is needed to achieve the cooldown of a system.</p>
7.6.4 Transportasi	<p>Penghapusan kalimat “Permits, as required, should be obtained for the transport of hydrogen.”</p> <p>Penghapusan kalimat “Flares normally used for highway vehicular accident identification or warning should not be used in close proximity to vehicles transporting hydrogen.”</p>
7.6.6 Prosedur operasi	<p>Penghapusan kalimat “Procedures and checklists should be reviewed periodically to verify their effectiveness.”</p>
7.6.7.4 Prosedur penanganan tumpahan cairan	<p>Penghapusan paragraf berikut:</p> <p>“Note that some sources of hydrogen safety-related information will claim that the extension of the cloud of condensed water is a rough guide for the extension of the flammable hydrogen/air gas mixture cloud. This should by no means be taken as a basis for safety measures. The condensed water cloud is heavier than hydrogen and the hydrogen diffuses more rapidly than water vapour in air, making it likely that the extent of the hydrogen gas cloud will be greater than the apparent water vapour cloud”.</p>
7.7.2 Pengendalian melalui kebijakan dan prosedur	<p>Penghapusan paragraf “An organization may use documents such as this Technical Report as a basis or</p>

Uraian/Pasal/Subpasal	Modifikasi
organisasi	support of its policies and procedures to ensure that hydrogen is used safely."
7.7.7 Kajian bahaya	Penghapusan paragraf "The best method for generating a hazard assessment document is to bring together several experts with various backgrounds in a series of structured, facilitated, "brainstorming" sessions. The aerospace industry, petrochemical industry, and chemical societies are excellent sources for examples and procedures for performing a hazard assessment."
Lampiran A	
A	Penghapusan kalimat "Table A.1 provides selected safety-related physical and thermophysical properties of normal and parahydrogen"
A1	Penghapusan pasal A1 yang berjudul "Comparison with other common gases"
A2	Penghapusan kalimat pada A1 "Table A.2 provides some safety-related thermophysical properties of gaseous hydrogen and other common gases for comparison purposes"
A2	Penghapusan pasal A2 yang berjudul "Comparison with other liquefied gases"
	Penghapusan kalimat pada A2 "Table A.3 provides some safety-related cryogenic properties of liquid hydrogen and other liquefied gases at their normal boiling point for comparison purposes"
	Penghapusan Tabel A3 yang berjudul "Table A.3 — Selected properties of some cryogenic fluids at their normal boiling point"
Lampiran B	
B.1	Penghapusan pasal B.1 yang berjudul "Safety-related combustion properties"
B.2	Penghapusan kalimat pada B.1 "Table B.1 provides selected safety-related combustion properties of parahydrogen"
B.2	Penghapusan pasal B.2 yang berjudul "Detonation cell widths for hydrogen/air mixtures"
	Penghapusan kalimat pada B.2 "Figure B.1 shows detonation cell widths for hydrogen/air mixtures"
B.3	Penghapusan pasal B.3 yang berjudul "Comparison of hydrogen with other common fuels"
	Penghapusan kalimat pada B.3 "Table B.2 compares the ignition and combustion properties of hydrogen and other

Uraian/Pasal/Subpasal	Modifikasi
Lampiran C	common fuels”
C.1	Penghapusan kalimat “However, the first one is unique to hydrogen, and the next two are important for liquid hydrogen applications, because of the low temperature involved (20 K). A brief discussion of these first three considerations is given below.”
C.2	Penghapusan pasal C.2 yang berjudul “C.2 Hydrogen embrittlement”
Lampiran E	<ul style="list-style-type: none"> • Perubahan isi dari Lampiran E, masuk ke dalam isi standar yaitu pasal 3 Istilah dan definisi • Penghapusan kalimat “This Technical Report is addressed to of many of the terms used herein”
Lampiran F	Penambahan Lampiran F untuk menunjukan deviasi/ penyimpangan dari ISO/TR 15916.



Bibliografi

NASA Standard NSS 1740.16, *Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems: Guidelines for Hydrogen System Design, Materials, Selection, Operations, Storage, and Transportation*. National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC, USA

IGC 15/96/E, *Gaseous Hydrogen Stations*. Industrial Gases Council, Brussels, Belgium

IGC 06/93/E, *Safety in Storage, Handling and Distribution of Liquid Hydrogen*. Industrial Gases Council, Brussels, Belgium

NFPA 50A, *Standard for Gaseous Hydrogen Systems at Consumer Sites*. National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA, 1999

NFPA 50B, *Standard for Liquefied Hydrogen Systems at Consumer Sites*. National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA, 1999

NRCC 27406, *Safety Guide for Hydrogen*. Hydrogen Safety Committee, National Research Council of Canada, Ottawa, 1987

BAIN, A., BARCLAY, J. A., BOSE, T. K., et al. *Sourcebook for hydrogen applications*. Hydrogen Research Institute and National Renewable Energy Laboratory. 1st edition. 1998

BENZ, F.J., BISHOP, C. V., AND PEDLEY, M. D., *Ignition and Thermal Hazards of Selected Aerospace Fluids: Overview, Data, and Procedures*. RD-WSTF-0001, NASA White Sands Test Facility, Las Cruces, NM, USA, October 1988

MCCARTY, R. D., HORD, J. AND RODER, H. M., *Selected sifates of hydrogen (engineering design data)*, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Washington, DC, NBS Monograph 168, February 1981

EDESKUTY, F.J. AND STEWART, W.F., *Safety in the Handling of Kriogenik Fluids*, Plenum Press, New York, 1996, p. 1